

平成 29 年度

筑波大学情報学群情報科学類

卒業研究論文

剛体物理シミュレーションに基づく
金網ろ過性能算出ツールの性能評価

知能情報メディア主専攻

小倉裕貴

指導教員 三谷純

要 旨

ろ過材の一種である金網フィルタには、「畳織り」と呼ばれる構造を持つものがある。この構造は、一般的な製織で用いられる平織り構造より高いろ過性能を有するが、ろ過性能の計測に専用の機器を要する。また、測定手法が企業ごとに異なり、統一された評価手法が存在しない。このような背景から、物理演算エンジンによる剛体物理シミュレーションを用いた、金網フィルタのろ過性能算出ツールがこれまでに提案されている。既存手法では、主にフィルタの開口部を通り抜ける球体の最大径を求めることを目的としているが、剛体の摩擦係数や反発係数といったパラメータを適切に設定することで、粒子の堆積によるろ過性能の変化などもシミュレートできることが期待できる。また、既存手法では各種のパラメータを主に物理演算エンジンの初期値を用いて運用しているが、それらがシミュレーション結果に与える影響が十分に検証されていない。そこで本研究では、物理演算エンジンの各種パラメータが、剛体物理シミュレーションの精度にどのような影響を与えるかを検証し、金網フィルタのろ過性能を評価する上での適切な値を決定することを目的とする。また、その値を用いたシミュレーションと、専用の計測機器による実測値との比較を行い、ろ過性能指標の妥当性を検証する。本研究により、既存手法と比べてシミュレーションに対する信頼性を向上させ、実用的な評価指標を得られることが期待できる。また、剛体物理シミュレーションによるろ過性能評価の基礎を確立することで、加工による変形や、畳織り以外の織り構造への拡張が容易になることが期待できる。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究の目的	1
1.3	論文の構成	1
第 2 章	金網フィルタに関する予備知識	3
2.1	金網の種類と構造	3
2.1.1	SPW (Single Plain Dutch Weave)	3
2.1.2	DTW (Dutch Twilled Weave)	3
2.2	金網の幾何的特性	4
2.3	ろ過対象の粒子群	4
2.3.1	粒子径の定義	5
2.3.2	粒子径分布	5
2.4	ろ過性能の評価法	5
第 3 章	関連研究	7
3.1	CAGD 技術による織物の 3D モデルの提示	7
3.2	織布によるろ過のモデル化とシミュレーション	7
第 4 章	タイムステップ分割数の評価	9
4.1	実験方法	9
4.2	実験結果	10
第 5 章	PhysX の基礎的な実験	14
5.1	実験方法	14
5.2	実験結果	15
5.2.1	CCD を有効にしたときの実験結果	15
5.2.2	CCD を無効にしたときの実験結果	18
5.2.3	CCD の有無による相対誤差の違い	20
5.2.4	結論	20
第 6 章	近似形状としての角柱の角数	21
6.1	実験方法	21
6.2	実験結果	21
第 7 章	微細粒子の生成要否	23
7.1	実験方法	23
7.2	実験結果	25
第 8 章	金網フィルタと粒子の接触面特性	27
8.1	実験方法	27
8.2	実験結果	29
第 9 章	粒子径の層の配置順序	32
9.1	実験方法	32
9.2	実験結果	33
第 10 章	パーティクルカウンタの測定値との比較	35

10.1	実験方法.....	35
10.2	実験結果.....	37
第 11 章	結論.....	40
11.1	まとめ.....	40
11.2	今後の課題.....	41
付録 A	使用した環境.....	42
	謝辞.....	43
	参考文献.....	44

図目次

図 2.1 : SPW を上部から見た画像(左)と SPW の構造の図(右) (出典 : [1]).....	3
図 2.2 : DTW を上から見た画像(左)と DTW の構造の図(右) (出典 : [3]).....	3
図 2.3 : 豊織り金網フィルタの幾何学的特性を示した図解.....	4
図 2.4 : パーティクルカウンタの機器本体.....	6
図 4.1 : タイムステップごとの最小ろ過粒度の平均と計算ろ過粒度との相対誤差.....	11
図 4.2 : タイムステップ分割数ごとの最良ろ過粒度の平均と計算ろ過粒度との相対誤差 (タイムステップ分割数が 10 以上).....	11
図 4.3 : タイムステップ分割数ごとの分散.....	12
図 4.4 : タイムステップ分割数ごとの分散 (タイムステップ分割数が 10 以上).....	12
図 4.5 : タイムステップ分割数ごとの平均シミュレーション時間.....	13
図 5.1 : 井形に並べた円柱 (16 角形の角柱) と、開口部に落とされた球.....	14
図 5.2 : CCD を有効にしたときの、対辺寸法の大きさと通過した球径の平均との相対誤差.....	16
図 5.3 : 相対誤差の収束が早い系列のみの図 5.2 のグラフ.....	16
図 5.4 : CCD を有効にしたときのシミュレーションの分散.....	17
図 5.5 : 対辺寸法が 0.1m 以上 300m 以下における相対誤差の収束が早い系列のみの分散.....	17
図 5.6 : CCD を無効にしたときの、対辺寸法の大きさと通過した球径の平均との相対誤差.....	18
図 5.7 : 相対誤差の収束が早い系列に絞った図 5.6 のグラフ.....	18
図 5.8 : CCD を無効にしたときのシミュレーションの分散.....	19
図 5.9 : 対辺寸法が 0.1m 以上 300m 以下における相対誤差の収束が早い系列のみの分散.....	19
図 6.1 : 角数ごとの対辺寸法の大きさと通過した球径の平均との相対誤差.....	21
図 6.2 : 角数ごとのシミュレーションの分散.....	22
図 6.3 : 対辺寸法が 1000m 以下における角数ごとのシミュレーションの分散.....	22
図 7.1 : 粒子径ごとの層として配置された粒子.....	24
図 7.2 : 拡大率ごとの捕集率.....	25
図 7.3 : 拡大率ごとの分散.....	26
図 8.1 : 積み上がった粒子.....	28
図 8.2 : 接触面特性を変えたときの粒子径ごとの捕集率.....	30
図 8.3 : 接触面特性を変えたときのシミュレーションの分散.....	30
図 9.1 : 粒子径の層の順序を変えたときの粒子径ごとの捕集率.....	33
図 9.2 : 粒子径の層の順序を変えたときの粒子径ごとのシミュレーションの分散.....	34
図 10.1 : 矩形詰め込みによって配置された粒子.....	36
図 10.2 : 綾豊織 14 におけるシミュレーション結果の捕集率と、測定データの捕集率の絶対誤差.....	37
図 10.3 : 綾豊織 15 におけるシミュレーション結果の捕集率と、測定データの捕集率の絶対誤差.....	38
図 10.4 : 綾豊織 18 におけるシミュレーション結果の捕集率と、測定データの捕集率の絶対誤差.....	38

表目次

表 2.1 : 測定データに用いられる粒子径群	6
表 4.1 : タイムステップ分割数を変更したときの精度実験の条件	9
表 4.2 : タイムステップ分割数を変更したときの精度実験に使用する金網フィルタの規格	9
表 5.1 : PhysX の基礎的な精度実験の条件	14
表 7.1 : 微細粒子の生成要否実験の条件	23
表 7.2 : 微細粒子の生成要否実験に用いる金網フィルタの規格	23
表 7.3 : 可変倍率粒子径分布	24
表 8.1 : 接触面特性を変更したときの精度実験の条件	27
表 8.2 : 接触面特性を変更したときの精度実験に用いる金網フィルタの規格	27
表 8.3 : パーティクルカウンタ粒子径分布	28
表 8.4 : 金網フィルタの体積に応じて粒子数を抑制したパーティクルカウンタ粒子径分布	29
表 9.1 : 粒子径ごとの層の配置順序を変えたときのろ過性能測定実験	32
表 9.2 : 粒子径のグループ	32
表 10.1 : パーティクルカウンタとの比較実験の条件	35
表 10.2 : 使用する金網フィルタの規格	35
表 10.3 : 使用する粒子径分布	37
表 A.1 : 使用したライブラリと開発環境のバージョン	42
表 A.2 : 使用した PC のスペック	42

第1章 序論

1.1 研究背景

我々が安全な暮らしを送るためには、異物が除去された水や空気は欠かせないものである。異物や有用物を除去や分離する方法に、細かな開孔部を持つフィルタに流動体を通す「ろ過」という操作がある。そのようなフィルタに用いられる素材の中に、金網フィルタと呼ばれるものがある。これは機械的強度や耐熱性に優れ、剥離や経時変化が小さく、様々な構造に加工できるという特性をもつ。その中でも、特に「畳織り」と呼ばれる構造は、高い強度と流動性、低い圧力損失などの特性を持つが、開孔部を上部から確認できないために、光学的測量が困難であるという問題がある。そのため、企業によって測定手法が異なり、測定手法に応じた独自のろ過性能評価を行っており、統一された評価指標が存在しない。

1.2 研究の目的

畳織り金網フィルタのろ過性能を剛体物理シミュレーションによって算出するシステムが小林らによって提案され[1]、山倉らによって粒子径分布を用いることで粒子の目詰まりを考慮した、より現実的なシステムに改良された[2]。小林らのシステムでは、金網フィルタの理想的な近似 3D モデルを作成し、ろ過対象の粒子に見立てた剛体球を落下させることにより、通過した球から、性能の指標となる金網フィルタが除去できる最小の粒子径と、ISO の定める粒子径分布[20]を持つ粉体に対するろ過性能を算出することを提案した。これらの既存手法には、物理演算エンジンとして PhysX が用いられた。PhysX による剛体物理シミュレーションでは、タイムステップ分割数や剛体の摩擦係数といった各種パラメータを適切に設定することで、優れた精度のシミュレーションが行えるものと期待できる。しかし、これまでの研究開発では、主に初期値のまま運用されるパラメータもあった。

そこで本研究では、各種パラメータがシミュレーション結果に与える影響を、PhysX を用いた基礎的な実験にまで立ち返って検証し、金網のろ過性能を算出するための適切なパラメータを決定し、提案システムのシミュレーションの精度を改良することを 1 つの目的とする。また、ろ過前とろ過後の液中の粒子数を計測する「パーティクルカウンタ」と呼ばれる専用の機器によるろ過性能の実測値と、シミュレーション結果を比較することで、提案システムのろ過性能指標としての妥当性を評価し、より実用的な評価指標を得ることを目的とする。

また、メッシュに変形のない理想的な状態においては、幾何的に開口部を通る最大球の直径を求める計算式が存在するが、加工によって変形した金網や、不織布にみられるような複雑な織り構造をもつ金網の場合、理論的な算出は困難である。そこで、本研究によって剛体物理シミュレーションによるろ過性能評価の基礎を確立することで、今後、拡張が考えられる他の織り構造への適用が容易になるものと期待できる。

1.3 論文の構成

本論文は全 12 章で構成される。第 2 章では、前提となる金網フィルタの構造や粒子径分布、ろ過性能測定の手法について述べる。第 3 章では、本研究を行う以前から行われてきた織り構造に関する関連研究について述べる。

第 4 章では、単位秒あたりのシミュレーションの進行量を離散化したタイムステップ分割

数が、精度に与える影響について述べる。タイムステップ分割数は、大きくすることで精度が上がるが、シミュレーション時間も増加する。そこで、精度を維持しつつ、シミュレーション時間も短くなるような妥当なタイムステップ分割数を検証し、今後のシミュレーションの基礎となるデフォルトのタイムステップ分割数を決定することを目的とする。

第 5 章では、PhysX の基礎的な実験に立ち返り、PhysX を用いた剛体物理シミュレーションの精度について述べる。前章の結果である理論値との相対誤差は比較的大きな値であり、誤差がどの段階で発生しているのか検証する必要がある。そこで、ごく単純な金網フィルタを用いた物理シミュレーションによって、PhysX の物理演算エンジンの基礎的な精度を検証する。検証では、PhysX 仮想空間上のスケールや、スケールに関するパラメータを変更したときの精度への影響を評価し、適切な精度を発揮するパラメータを決定することを目的とする。第 6 章では、前章の結果をもとに、前章と同じ条件下で円柱の近似形状である角柱の角数を変更したとき、精度に与える影響について述べる。

第 7 章では、金網フィルタに対して十分に小さい粒子が、シミュレーションに与える影響について述べる。粒子径分布に沿った粒子を生成するとき、粒子の最低生成数によっては、金網フィルタに対して十分に小さい粒子が大量に生成され、シミュレーション時間が長くなるという問題があった。このような微細な粒子は、より大きな粒子のろ過に影響を与えることもなく、大部分が金網フィルタを通過すると考えられるため、粒子の生成を省けるかを検証し、不要であれば生成を打ち止めとすることを目的とする。

第 8 章では、金網フィルタと粒子の動摩擦係数、静摩擦係数、反発係数を変更したとき、シミュレーションに与える影響について述べる。これらの値によっては、金網フィルタ上における粒子の堆積状態が変化し、ろ過性能に影響があると考えられる。そこで、1 つのパラメータのみを変更した組み合わせでシミュレーションを行い、ろ過性能にどのような変化があるかを検証する。

第 9 章では、粒子を粒子径ごとの層として配置しているとき、層の配置順序がシミュレーションに与える影響について述べる。粒子径が大きい粒子の層を下層に配置した場合、金網フィルタの目詰まりが早まることによって、ろ過性能に影響があると考えられる。そこで、粒子径の大きさをグループに分け、それらの順序を変更したとき、ろ過性能にどのような変化があるかを検証する。

第 10 章では、第 4 章から第 9 章で述べた、より良い精度となる条件下でシミュレーションを行い、パーティクルカウンタによる実測値との比較について述べる。検証には、パーティクルカウンタの測定に使用した金網フィルタや粒子数をシミュレーターに再現し、そのシミュレーション結果と実測値を比較することで、シミュレーターのろ過性能指標の妥当性について検証する。

第 11 章では、本研究で得られた結果をまとめ、今後の課題について述べる。付録では、本研究で用いたライブラリや、実験に使用した PC の環境について述べる。

第2章 金網フィルタに関する予備知識

2.1 金網の種類と構造

本節では、2種類の金網フィルタの織り構造について説明する。畳織り構造をもつ金網フィルタは主に「平畳織り」と「綾畳織り」に分類される。平畳織りと綾畳織り構造の金網フィルタは数種類存在するが、本研究では、パーティクルカウンタによる測定に用いられた実在する製品の規格から、次の2つの金網フィルタについて取り扱う。2.1.1節でSPW(Single Plain Dutch Weave)と呼ばれる金網フィルタについて述べる。次に、2.1.2節でDTW(Dutch Twilled Weave)と呼ばれる金網フィルタについて述べる。

2.1.1 SPW (Single Plain Dutch Weave)

SPWは図2.1に示すような通常の平畳織構造を持つ金網フィルタである。平畳織りは、縦方向に伸びる等間隔の縦線のワイヤと、横方向に伸びる相接するように並ぶ横線のワイヤが、縦線と1本ずつ交互に交わる織り方である。

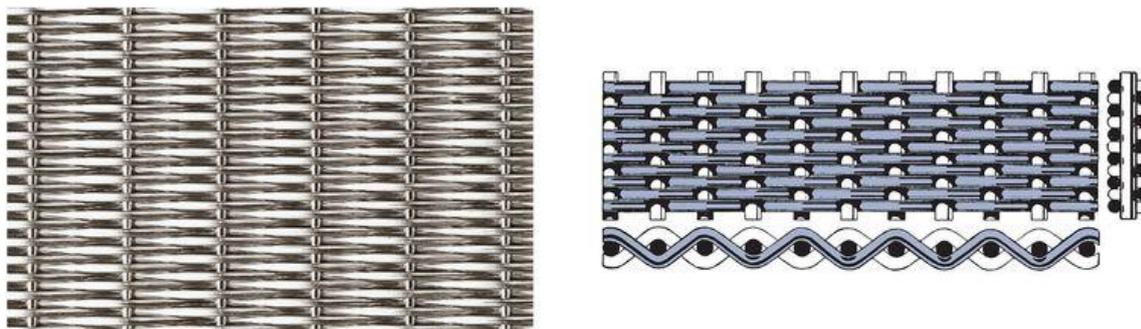


図 2.1 : SPW を上部から見た画像(左)と SPW の構造の図(右) (出典 : [3]).

2.1.2 DTW (Dutch Twilled Weave)

DTWは図2.2に示すような綾畳織り構造を持つ金網フィルタである。綾畳織りは、縦線と横線が2本ずつ交互に交わる織り方である。横線の密度がSPWに比べて2倍ほど高いという特徴を持つ。

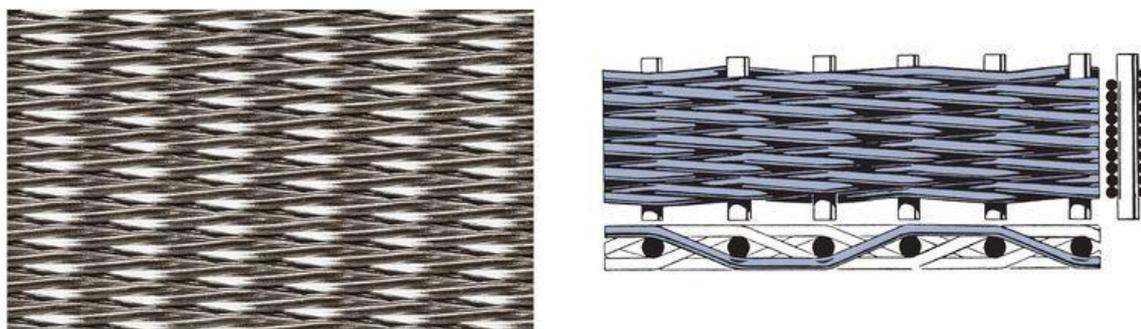


図 2.2 : DTW を上から見た画像(左)と DTW の構造の図(右) (出典 : [3]).

2.2 金網の幾何的特性

金網フィルタには、幾何学的特性を決定する複数のパラメータが存在する。畳織り構造を持つ金網フィルタの場合、縦線と横線で線の構造が異なるため、線の方角ごとに図 2.3 で図解するパラメータが異なる。

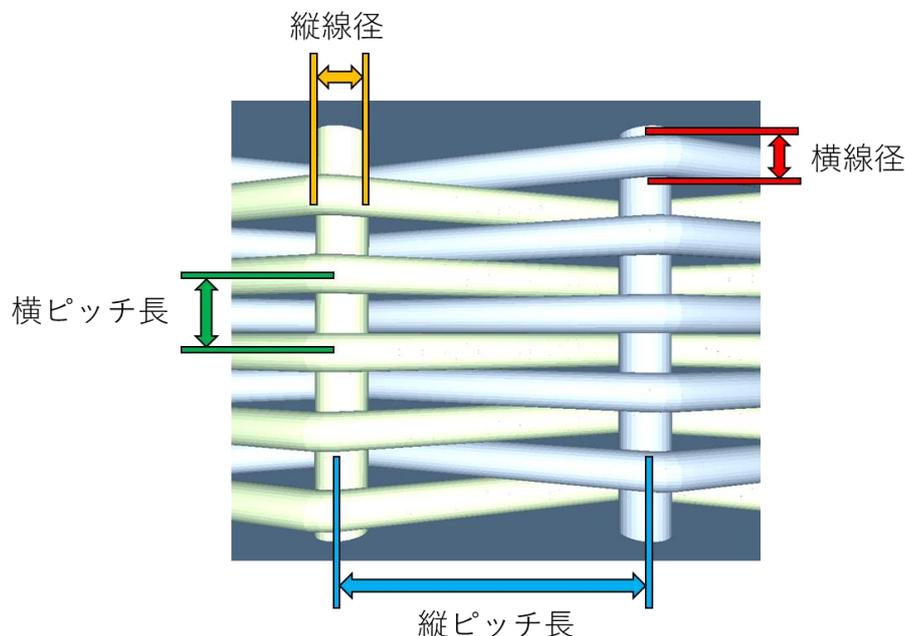


図 2.3 : 畳織り金網フィルタの幾何学的特性を示した図解

メッシュ数

メッシュ数は、1inch あたりの網目の数である。しかし、畳織りのときは、通常の織り方における網目である開孔部を上部から確認できないため、1inch あたりの線の本数と定義される。

ピッチ長

ピッチ長は、2本の線の間隔である。既存手法[1][2]では金網フィルタのモデリングの際に使用していたが、本研究では実在する金網フィルタを元にした評価を行うため、使用する規格表に記載されているメッシュ数を主に扱うものとする。

線径

線径は、線の断面形状の直径を指す。縦と横のメッシュ数が等しくとも、線径が異なることで開孔部の大きさが異なり、ろ過性能に違いが現れる。

2.3 ろ過対象の粒子群

現実のろ過作業においては、金網フィルタの開孔部より大きな粒子が、金網フィルタ上に堆積することがあり、堆積した粒子を「ケーキ」と呼ぶ。ケーキは金網フィルタに目詰まりを起し、ろ過性能を変化させることから、ケーキの挙動を再現することで現実的なシミュレーションが可能になると期待される。山倉らの手法[2]では、ケーキ形成に「粒子径分布」

を用いることで、実際のろ過作業に近いシミュレーションを実現した。

本節では、2.3.1 節で本研究における粒子径の定義について述べ、2.3.2 節で粒子径分布について述べる。

2.3.1 粒子径の定義

ろ過作業の対象となる粒子は、電子顕微鏡などで観察すると複雑で不規則な形状をしていることが確認できるが、このような粒子に大きさを定義することは困難である。そこで本研究では、粒子を球としたときの直径を粒子径として扱う「球相当径」を代替として用いることとする。

2.3.2 粒子径分布

粒子径分布とは、粉体に含まれる粒子径ごとの粒子の存在比率の分布である。存在比率の基準には粒子の個数、長さ、面積、体積などがあるが、本研究で主に用いる ISO AC ダスト [20] は、体積基準と同等であるため、本研究では存在比率の基準に体積を用いることとする。

パーティクルカウンタによるろ過性能測定には、ISO AC ダスト Fine(A2)粒子径分布[20] が用いられている。この粒子径分布は主に清浄機器の性能試験に用いられており、この粒子径分布に沿った粒子群を生成することで、比較対象であるパーティクルカウンタのろ過性能測定に近いシミュレーションが行えると期待できる。

本論文では簡便化のために、粒子径分布表における粒子径と存在比率に相当する指標を用いた場合も、同様に粒子径分布表と呼ぶこととする。例えば、第 7 章では粒子径を「粒子径を決定するための拡大率」に置き換え、存在比率を「粒子の生成数」に置き換えた独自の表を定義しているが、これも粒子径分布表として扱うものとする。

2.4 ろ過性能の評価法

金網のろ過性能の評価方法は、金網の構造や、金網フィルタを扱う企業によって測定法が異なる。ここでは本研究が実測値としてシミュレーション結果との比較に用いる、パーティクルカウンタと呼ばれる機器のろ過性能の評価法について説明する。

パーティクルカウンタとは、図 2.4 で示される空気中や液体中にある粒子数をカウントする計測器のことであり、微粒子計とも呼ばれる。パーティクルカウンタによるろ過性能の測定は次に示す手順によって行われる。

1. ISO AC ダスト Fine(A2)粒子径分布[20]に従う粉体である「コンタミ」を純水に加え、「原液」と呼ばれる液体を作成する。
2. 原液を金網フィルタによってろ過する。ろ過した後の液体を「ろ過液」と呼ぶ。
3. 原液の粒子数 M と、ろ過液の粒子数 m をパーティクルカウンタによって計測する。
4. 金網フィルタが、どれだけの粒子を捕集したかを示す捕集率 x を、次に示す式によって計算する。

$$x = 1 - \frac{m}{M} \quad (2.1)$$

パーティクルカウンタのろ過性能指標には、捕集率を用いる。捕集率が高いことは、金網フィルタによって多くの異物が除去されたことを示す。また、捕集率が低いことは、金網フ

フィルタを多くの異物が通過することを示す。



図 2.4 : パーティクルカウンタの機器本体

このようにして測定されたパーティクルカウンタの測定データは、共同研究を行っている株式会社八尾金網製作所から提供されたものを用いる。測定データには、次に示す値が記載されている。

原液の粒子数

原液で測定された粒子径ごとの粒子数が、実施日ごとに記載されている。粒子数は表 2.1 で示される粒子径ごとに計測される。このとき、表 2.1 で示される粒子径ごとの粒子数は、次に大きい粒子径未満の粒子数を計測する。例えば、粒子径が $5\mu\text{m}$ の場合は、粒子径が $5\mu\text{m}$ 以上 $6\mu\text{m}$ 未満の粒子数を計測する。粒子径が $30\mu\text{m}$ の場合は、粒子径が $30\mu\text{m}$ 以上の粒子数を計測する。

表 2.1 : 測定データに用いられる粒子径群

粒子径[μm]	5	6	7	8	9	10	12	15	20	30
----------------------	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----

ろ過液の粒子数

同じ規格の複数の金網フィルタによって、実施日ごとに異なる原液をろ過した、ろ過液の粒子数が記載されている。

捕集率

原液の粒子数とろ過液の粒子数から計算した捕集率が記載されている。捕集率は負値になる場合もある。

パーティクルカウンタによって測定された粒子数は、「区間カウント/ml」と、区間カウント/ml を 5 倍した「区間カウント」の 2 つがある。シミュレーターで用いる粒子数には区間カウントを用いることとする。

第3章 関連研究

金網フィルタのろ過性能シミュレーションやモデリングに関する研究は少ない。しかし金網の構造である織物や編み物に関する研究は多い。本章では、織り構造に関する研究について述べる。

3.1 CAGD 技術による織物の 3D モデルの提示

Sabit Adanur と Tianyi Liao[4]らは、コンピューター支援による幾何学設計 (CAGD) 技術による織物の 3D モデルの作成方法と、様々な織物の 3D モデルを提示した。

織り幾何学のモデルには、織物幾何学モデル[5]、線維連結モデル[6]、組紐構造のための線維傾斜モデル[7]、モザイクモデル[8]、縮れモデル[9]、織構造のための橋モデル[10]、マルチワープニット生地のための傾斜ユニットセルモデル[11]、3D アングル連結織りのための線維傾斜モデル[12]がある。しかし、織物構造の 3D モデルに関する研究は報告されていなかった[13]。

Sabit らの手法では、まずパラメトリック関数を用いて織り糸中心曲線を定義し、曲線に垂直な法平面上に存在する単位法線ベクトルと、単位従法線ベクトルからローカル座標系における糸断面曲線を求めた。次に、グローバル座標系における糸断面曲線を求め、織り糸中心曲線に沿うように一連の糸断面形状を計算し、最後に全ての点を接続することで織物の 3D モデルを作成した。これらの CAGD 技術による 3D モデル作成手法を用いて、3D 織物モデルを示した。3D 織物モデルは、面上に配置されるような厚みの小さい 2D 織物と、厚みに考慮する 3D 織物に分類された。2D 織物では平織りや、綾織りといった織りモデルの構造と特徴について述べられ、3D 織物には、直交織りや極座標構造の織りモデルの構造と特徴について述べられた。

3.2 織布によるろ過のモデル化とシミュレーション

Nazarboland[14]らは、幾何学的な 3D 織布モデルと、計算流体力学を用いたろ過プロセスをインターフェース化するUniverFiltere™[15]というソフトウェアを開発した。この手法では、3D 織布構造の作成と、ろ過プロセスのモデル化という 2 段階を踏まえて、織布フィルタのろ過シミュレーションソフトウェアを構築した。3D 織布モデルの作成手法には、Peirce[16]の織布モデルと、3 次スプラインのエルミート変形[17]を利用した。また、ろ過プロセスのモデル化には、計算流体力学ソフトウェアであるFluent Inc.[18]を解析に用いた。

Nazarboland[14]らはUniverFiltere™[15]の開発を通して、効率的なフィルタ特性をもつ織布フィルタを作成するためのソフトウェアの基盤を確立し、織布構造のパラメータが流体流動に影響を与える振る舞いを持つことを示した。

本研究で用いる PhysX をはじめとする一般に広く用いられる物理演算エンジンは、剛体モデルに対して優れた性能を持つが、柔軟物体は簡易な近似モデルを用いることが多い。そして、Nazarboland らが織布フィルタのろ過シミュレーションに用いた流体モデルや、流体と剛体の相互作用は扱えず、広く製品開発に用いられているような有限要素法をベースとした変形シミュレーションを行うことができない。

そこで本研究では、流体流動モデルなどを用いない高速な剛体物理シミュレーションによ

って、専門の機器を用いる測定にかかる時間と労力を短縮しつつ、シミュレーション結果が
ろ過性能指標として妥当であることを示す。

第4章 タイムステップ分割数の評価

PhysX では、物理演算を行う物体を配置した PhysX 上の仮想空間をシーンと呼び、このシーンに対して、進行量となる時間を指定して、その時間だけ剛体物理演算を進行させることで物理シミュレーションを行う。このとき、単位秒あたりの進行量を離散化して計算するための分割数を、「タイムステップ分割数」と呼ぶこととする。

タイムステップ分割数は、その値を大きくすることで物理シミュレーションの進行量を小さくし、物体同士の相互作用を精密に計算することで、シミュレーションの精度を向上させることができる。しかし、フレームあたりのシミュレーション回数が増えるため、シミュレーションにかかる時間が増大するという問題がある。そこで、精度を維持しつつ、シミュレーションにかかる時間を最小化するようなタイムステップ分割数を実験によって決定する。

4.1 実験方法

実験は、表 4.1 のような条件下で行う。本研究では、使用している PhysX のバージョンを含む、提案システムに用いられているライブラリと開発環境の情報および、シミュレーションに使用した全ての PC スペックについての情報を末尾の付録に示し、実際の実験で使用した PC については表 4.1 の「使用する PC」に示すものとする。

また、実験に使用する金網フィルタには、共同研究を行っている株式会社八尾金網製作所が提供する金網規格表[19]から、実際に製造されている表 4.2 のような 3 種類の平畳織り金網フィルタを選ぶ。

表 4.1: タイムステップ分割数を変更したときの精度実験の条件

使用する PC	表 A.2 の PC1
金網断面形状	円に内接する 16 角形
最低生成粒子数	50
金網と球の動摩擦係数	0.45
金網と球の静摩擦係数	0.45
金網と球の反発係数	0.45

表 4.2: タイムステップ分割数を変更したときの精度実験に使用する金網フィルタの規格

タイプ	縦糸の直径[mm]	横糸の直径[mm]	縦糸のメッシュ数[mesh]	横糸のメッシュ数[mesh]	計算ろ過粒度[μm]
平畳織 0	0.18	0.14	24	200	127
平畳織 1	0.21	0.14	24	200	134
平畳織 2	0.14	0.11	50	250	72

まず実験で行うシミュレーションについて説明する。シミュレーションは、表 4.2 で示した金網フィルタの上部に、剛体球を落下させる。落下した球のうち、開孔部を通過しない球

径から、金網フィルタが除去できる最小の粒子径を「最小ろ過粒度」と呼ぶこととする。

ここで、使用する金網フィルタを平畳織りに限定するのは、平畳織り構造が、幾何学的計算による粒子径の算出手法[1]により最小ろ過粒度の理論値を計算できるためである。ここでは、計算によって求められた最小ろ過粒度の理論値を「計算ろ過粒度」と呼ぶこととする。計算ろ過粒度は、次に示すような r についての2次方程式の解のうち、値が正となるものである。ここで、 r_0 は縦線の半径[mm]、 r_1 は横線の半径[mm]、 M は縦線のメッシュ数[mesh]である。

$$B_x^2 r^2 + 2r\{B_x(B_x r_0 + P_y^2) - (r_0 - r_1)(B_x^2 + P_y^2)\} + (B_x r_0 + P_y^2)^2 - (r_0^2 + P_y^2)(B_x^2 + P_y^2) = 0 \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} R = r_0 + r_1 \\ B_x = \frac{25.4}{2M} \\ P_y = \frac{RB_x}{\sqrt{B_x^2 + R^2}} \end{cases} \quad (4.2)$$

シミュレーションは、球が金網フィルタを通過した場合、より大きな球径の剛体球を再生成し、球が金網フィルタを通過しなかった場合、より小さい球径の剛体球を再生成する。このような二分探索的な再生成を、通過した最大の球径 D_{\max} と通過しない最小の球径 D_{\min} が、次式を満たすまでシミュレーションを繰り返し、最小ろ過粒度を求めることを目的とする。

$$1 - \frac{D_{\min}}{D_{\max}} < 0.0001 \quad (D_{\min} < D_{\max}) \quad (4.3)$$

ここではそのようなシミュレーションを「最小ろ過粒度の測定・空隙率計算」と呼ぶこととする。本実験では、最小ろ過粒度の測定・空隙率計算を、1つのタイムステップ分割数に対して20回行い、タイムステップ分割数1から20までの最小ろ過粒度を求める。しかし、PhysXの物理シミュレーションは、同じパラメータによるシミュレーションは同じ結果になる。そこで、試行ごとに球の初期位置を上方に僅かにずらすこととする。現実的なシミュレーションであれば、ランダム性を与えたほうが良いと考えられるが、今回のシミュレーションは金網の開孔部の大きさという幾何的特性を求めることに重視し、現実的なろ過作業を再現することは重視しないため、ランダムな配置を扱わないものとする。

また、タイムステップ分割数を大きくしたときのシミュレーションに要する時間への影響を調べるため、シミュレーション関数の実行にかかる時間を計測する。

4.2 実験結果

20回のシミュレーションによる最小ろ過粒度の平均値と、理論値である計算ろ過粒度との相対誤差を計算する。相対誤差のグラフは図4.1のようになった。タイムステップ分割数が小さな値のとき、コリジョン抜けと呼ばれる現象によって相対誤差が非常に大きくなっていることが確認できる。コリジョン抜けとは、シミュレーションの進行量であるタイムステップが大きいとき、移動間にある物体の衝突を考慮せずにすり抜ける現象である。タイムステップ分割数が小さい時、コリジョン抜けによって球が金網フィルタのメッシュをすり抜けたために、相対誤差が大きくなっていることが確認できる。

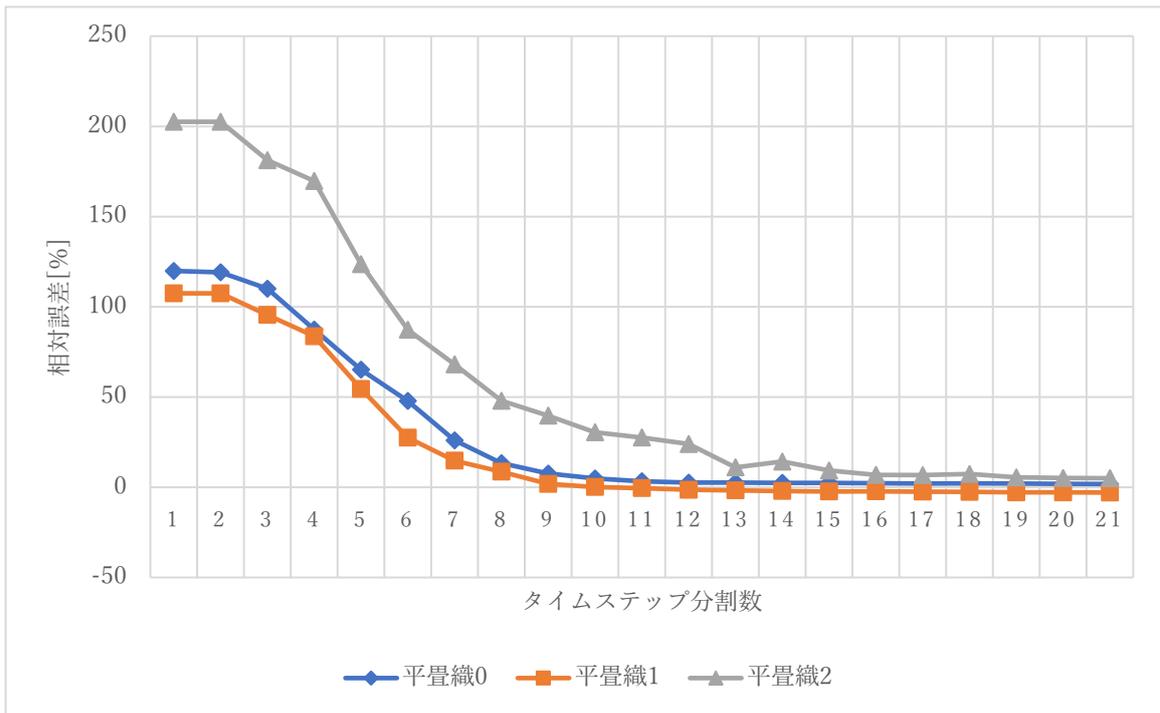


図 4.1 : タイムステップごとの最小ろ過粒度の平均と計算ろ過粒度との相対誤差

コリジョン抜けが発生していない、タイムステップ分割数が 10 以上のときの相対誤差のグラフは図 4.2 のようになった。金網フィルタによって相対誤差の大きさに違いがあるものの、タイムステップ分割数が 16 以上のとき、相対誤差は約±5%に抑えられることが確認できる。

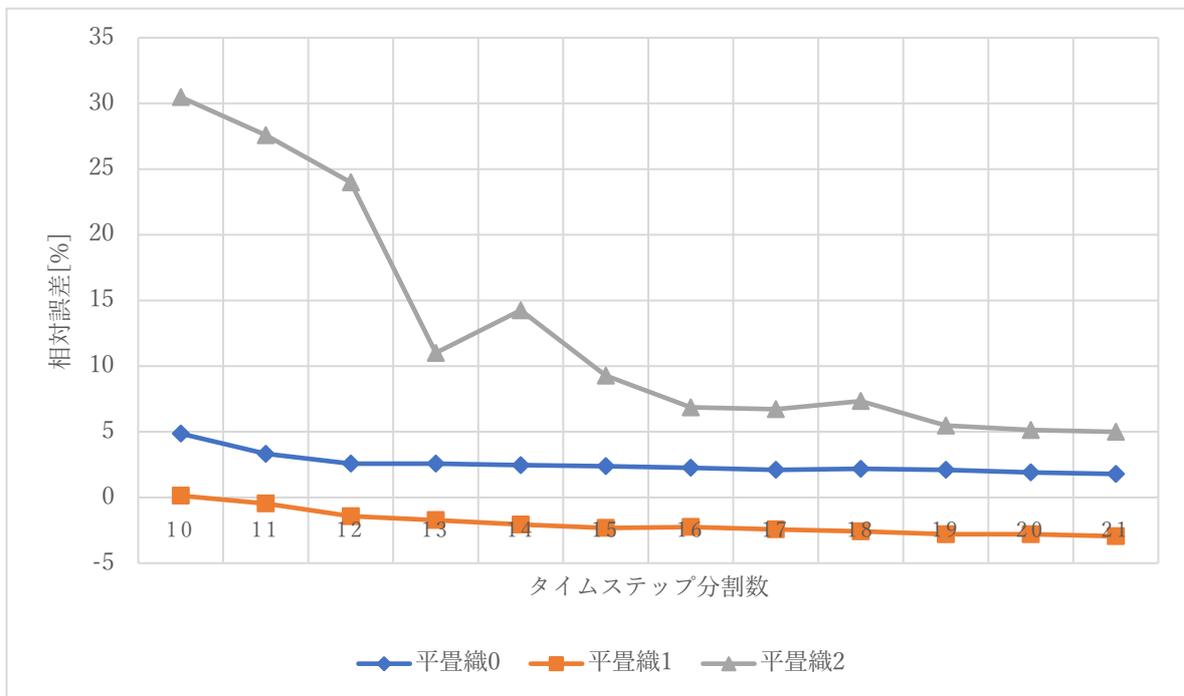


図 4.2 : タイムステップ分割数ごとの最良ろ過粒度の平均と計算ろ過粒度との相対誤差 (タイムステップ分割数が 10 以上)

20回のシミュレーションにおける分散は図 4.3 と図 4.4 のようになった。図 4.3 から、タイムステップ分割数が 5 のとき分散は最大となり、それ以降減少し、タイムステップ分割数が 15 以降は比較的小さくなっていることが確認できる。タイムステップ分割数が 5 未満の分散は、コリジョン抜けによって金網フィルタを全ての球が通過してしまい、シミュレーション結果が同じになるため、分散が小さくなったと考えられる。

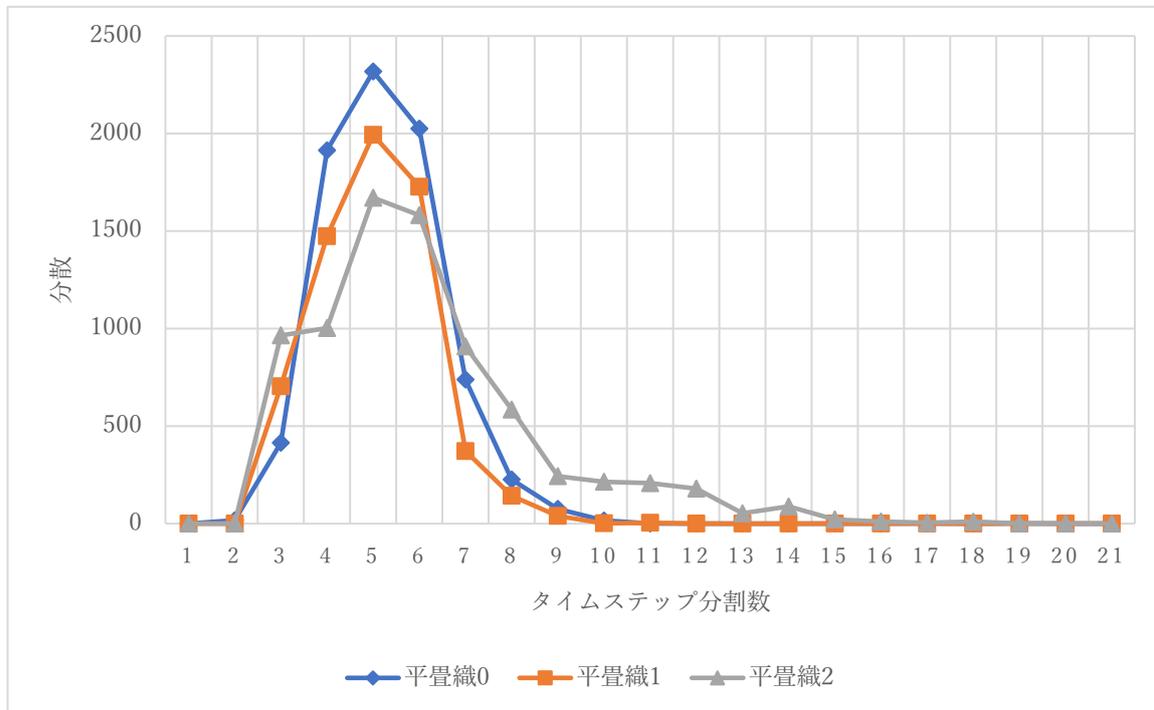


図 4.3 : タイムステップ分割数ごとの分散

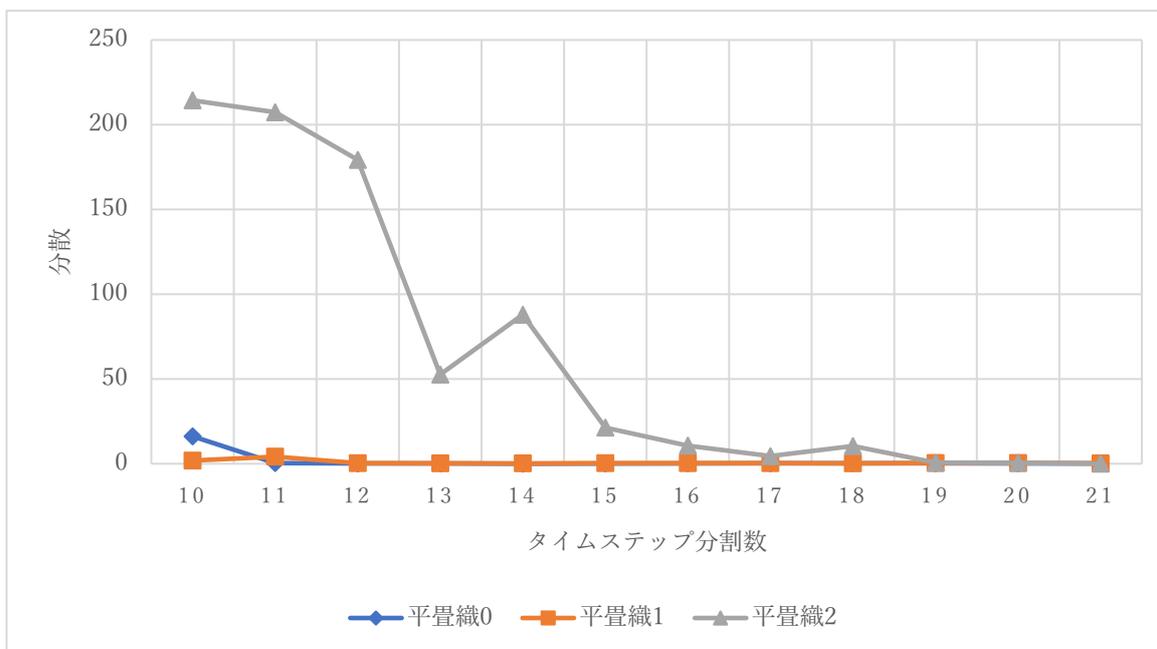


図 4.4 : タイムステップ分割数ごとの分散 (タイムステップ分割数が 10 以上)

平均シミュレーション時間は図 4.5 となった。タイムステップ分割数を大きくするごとに、ほぼ同じ量だけシミュレーション時間が増加していることが確認できる。また、金網フィルタによってシミュレーション時間の違いはそれほど大きくないことが確認できる。

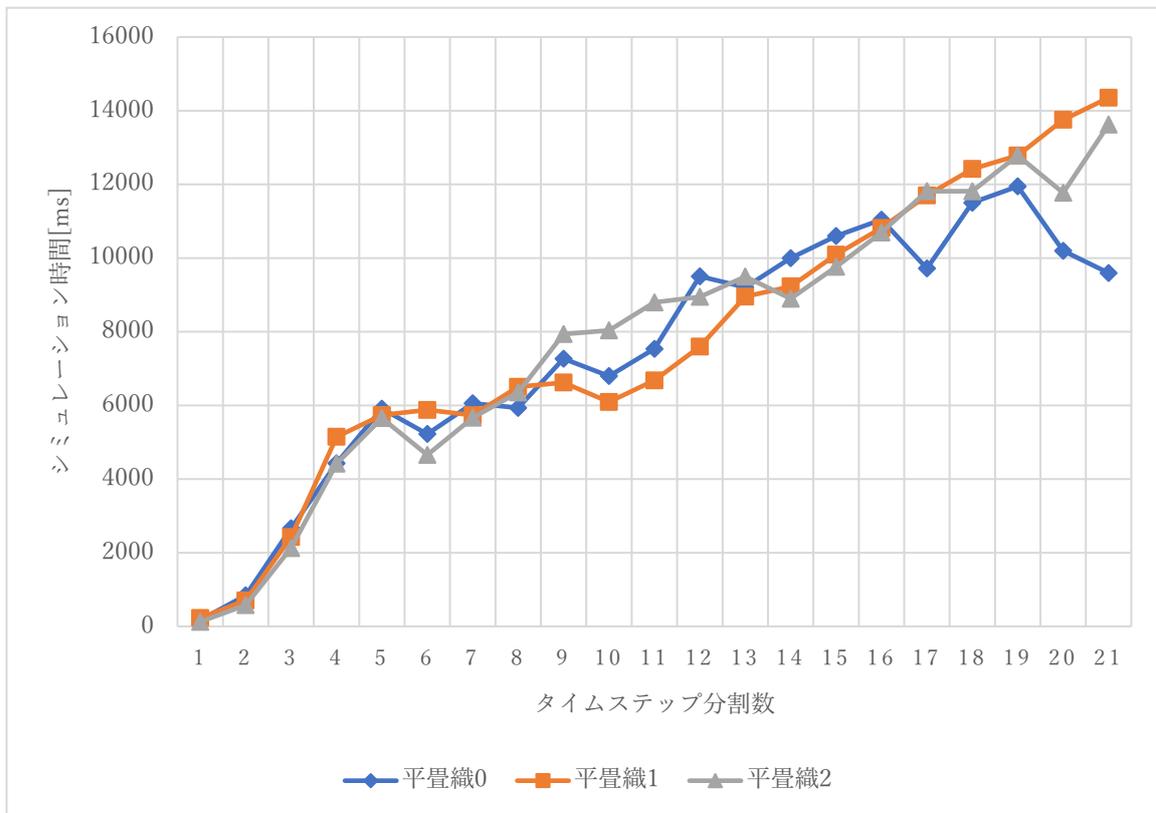


図 4.5 : タイムステップ分割数ごとの平均シミュレーション時間

シミュレーション結果から、理論値との相対誤差が十分小さくなることが期待されるデフォルトのタイムステップ分割数として、16 を選ぶこととする。

第5章 PhysX の基礎的な実験

第4章では、シミュレーション結果と理論値との間に少なくとも $\pm 5\%$ の相対誤差があることが明らかとなった。この誤差は比較的大きい値であり、誤差の原因を検証する必要がある。そこで本章では、PhysX の基礎的な実験にまで立ち返り、物理シミュレーションの精度を測定する。

5.1 実験方法

実験は、表 5.1 のような条件下で行う。

表 5.1 : PhysX の基礎的な精度実験の条件

使用する PC	表 A.2 の PC1 と PC2 と PC3
円柱の断面形状	円に内接する 32 角形
円柱と球の動摩擦係数	0.45
円柱と球の静摩擦係数	0.45
円柱と球の反発係数	0.45

実験ではまず、円柱の近似形状としての 32 角柱を、図 5.1 のように同一平面上に井形に並べる。このとき、角柱の外接円の直径を d [m] とし、井形に並べたときに形成される正方形の開口部の対辺の距離を「対辺寸法」と定義し、対辺寸法がそれぞれ d [m] となるように角柱を配置する。また、平行に並ぶ角柱は、辺同士で向かい合うように配置する。

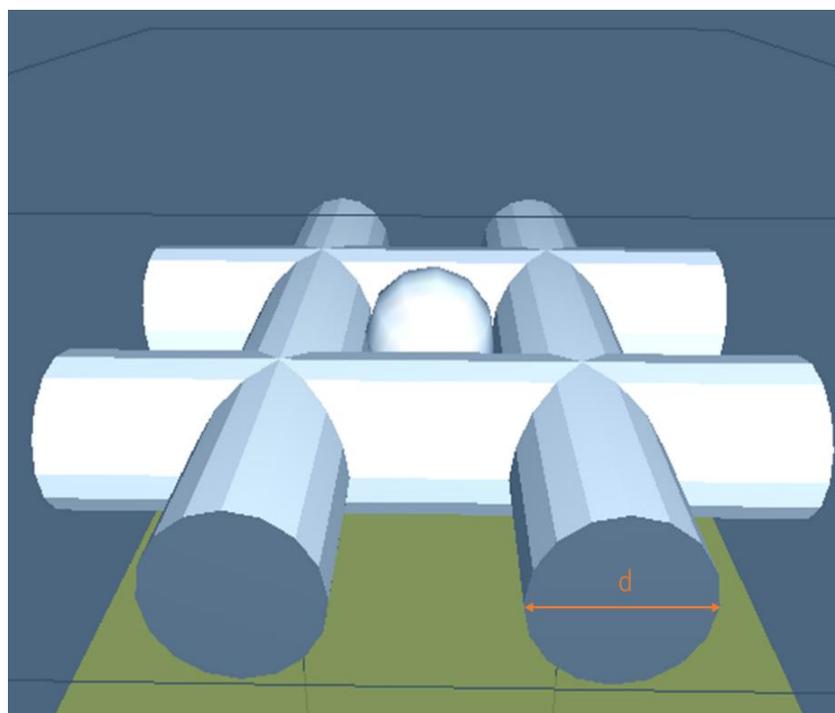


図 5.1 : 井形に並べた円柱 (16 角形の角柱) と、開口部に落とされた球

実験は、4.1 節における球生成の手法と同様に、角柱の上部から球を落とし、球が開口部を通過したときより小さい球を生成し、通過しなかったときより大きな球を生成することを繰り返し、開口部を通過する最大球径を二分探索的に求める。このようなシミュレーションを、球の初期生成位置を僅かに変えながら 20 回行う。

また本実験では、一定の拡大率によって全てのメッシュを拡大することで、シーン全体のスケールの違いがシミュレーション結果に与える影響を検証する。ここで、PhysX にはシーンのスケールによって、シミュレーションの精度に影響を与えるパラメータがある。実験では、次に示すパラメータを、とり得る値で組み合わせて、それぞれの組み合わせがスケールの違いによってシミュレーション結果にどのような影響を与えるか検証する。

Contact Offset

物体同士の衝突検出を行うための接点を作り始める距離 Contact Distance を決定するための値である。Contact Offset が 0.02 のとき、Contact Distance は 0.4m となる。32bit 浮動小数点数の取りうる最大値を Max Float とするとき、Contact Offset の有効な値の範囲は [Rest Offset, Max Float] となる。デフォルト値は 0.02 である。

Rest Offset

物体同士のめり込みを解消するための最大の反発力に達するまでの距離を決定するための値である。有効な値の範囲は [-Max Float, Contact Offset] である。デフォルト値は 0 である。

また本実験では、物体の移動間にある物体との衝突判定を厳密に行い、主にコリジョン抜けを防止するための CCD (Continuous Collision Detection) と呼ばれる機能の有無がシミュレーション結果に影響を与えるかを検証する。

5.2 実験結果

20 回のシミュレーションによって、井形に並べられた円柱の開口部を通過した球の最大直径の平均と、理論値である開口部の対辺寸法との相対誤差を計算する。

シミュレーションの結果、Contact Offset と Rest Offset の組み合わせによっては、円柱上部まで落下しないといった異常な挙動を示すものもあった。特に、Rest Offset が 0.1 以上の組み合わせは、全て異常な挙動を示すことが確認された。以降の実験結果では、正常にシミュレーションを完了できた結果のみ示す。

5.2.1 CCD を有効にしたときの実験結果

まず、CCD を有効にし、Contact Offset と Rest Offset の組み合わせを変えたとき、対辺寸法ごとの相対誤差は、図 5.2 のようになった。相対誤差の収束が比較的早い系列のみを選んだグラフは、図 5.3 のようになった。図 5.2 から、Contact Offset と Rest Offset をどのように組み合わせても、精度が改善する組み合わせはないことが確認できる。また、対辺寸法が 3m~300m の範囲において、相対誤差が約 5%に収束しているが、Rest Offset が 0.01 以上の組み合わせでは、この収束が遅いことが確認できる。

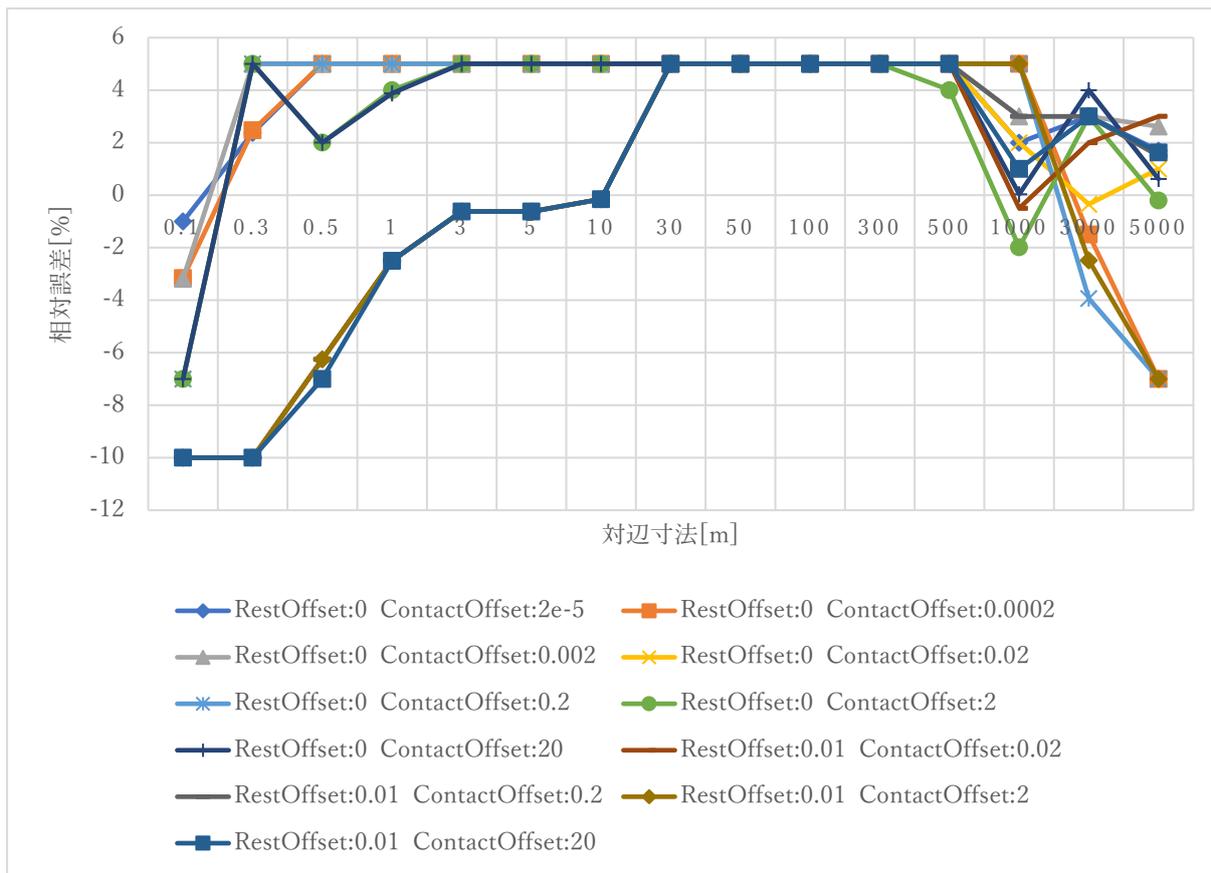


図 5.2 : CCD を有効にしたときの、対辺寸法の大きさと通過した球径の平均との相対誤差

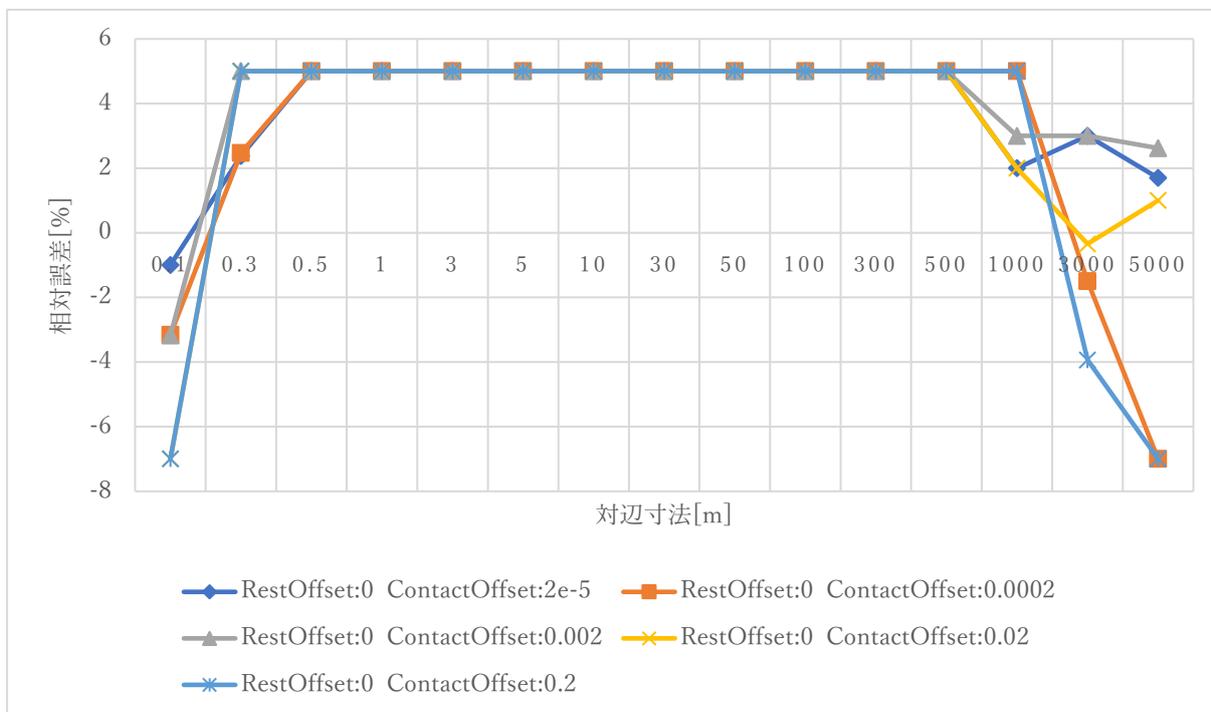


図 5.3 : 相対誤差の収束が早い系列のみの図 5.2 のグラフ

20回のシミュレーションの分散は図 5.4 のようになった。また、分散が比較的小さくなる対辺寸法が 0.1m~300m の範囲における、相対誤差の収束が比較的早い系列のみの分散は図 5.5 のようになった。図 5.5 から、相対誤差が 5%に収束している対辺寸法における分散は、ほぼ 0 となっていることが確認できる。相対誤差が 5%という結果は無視できるものではないが、分散が 0 であるという結果を考慮すると、補正値を導入することで、より理論値に近いシミュレーション結果を得られると考えられる。

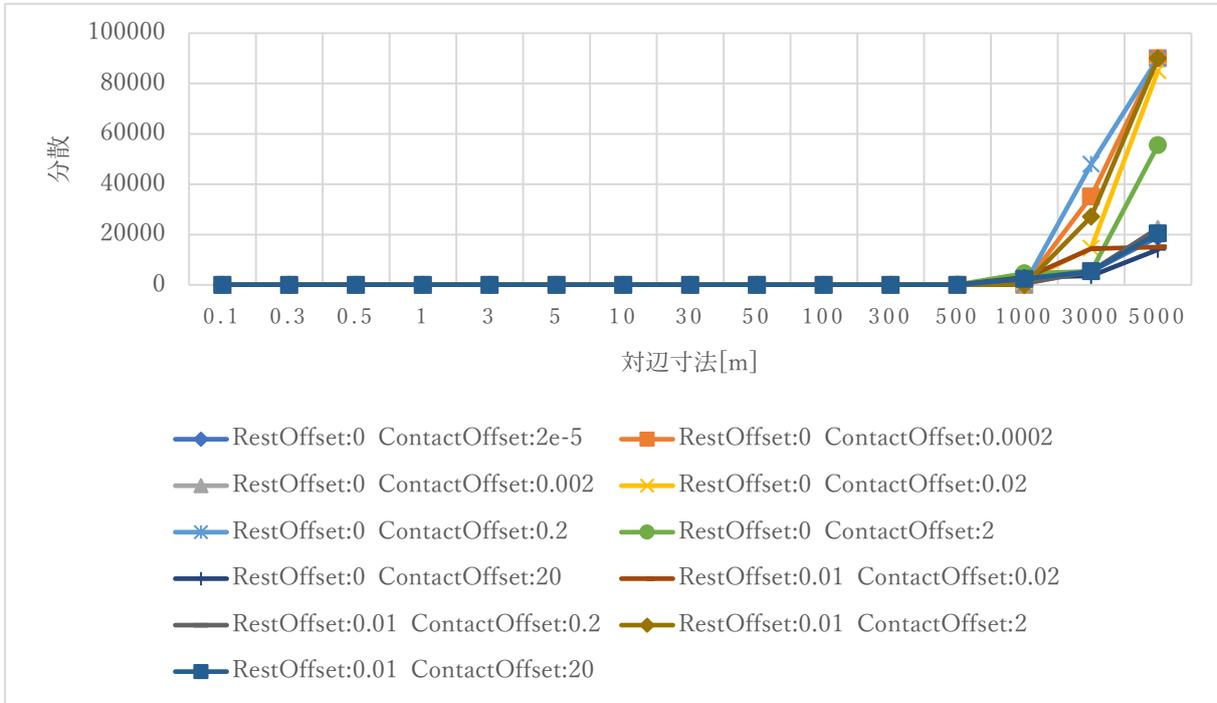


図 5.4 : CCD を有効にしたときのシミュレーションの分散

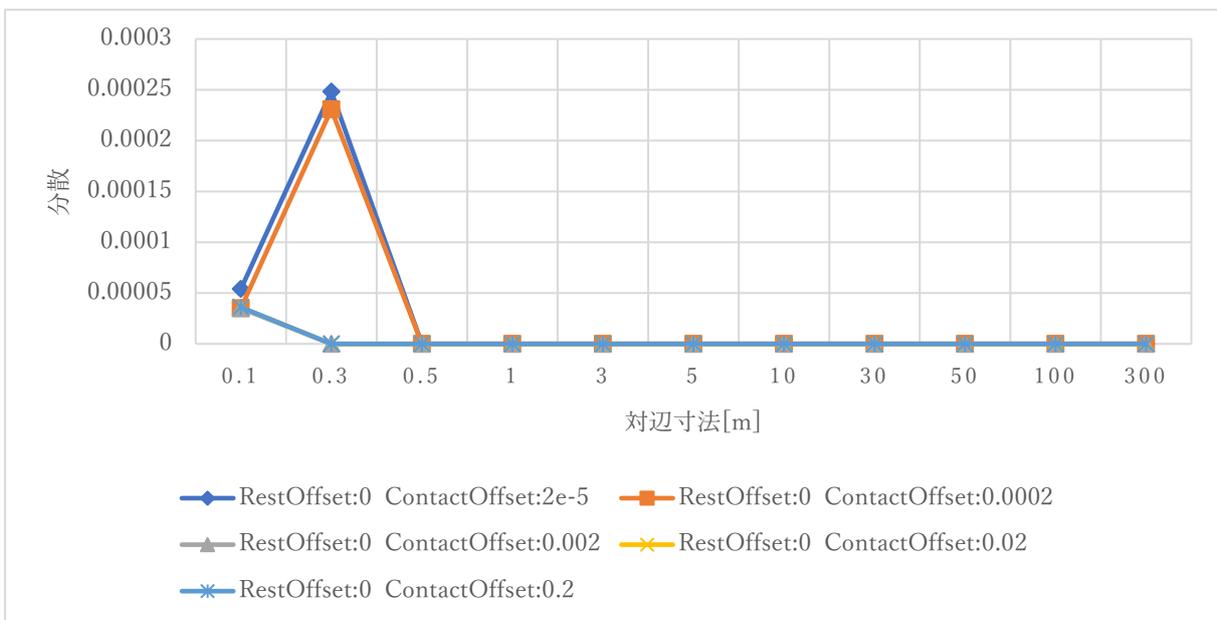


図 5.5 : 対辺寸法が 0.1m 以上 300m 以下における相対誤差の収束が早い系列のみの分散

5.2.2 CCD を無効にしたときの実験結果

CCD を無効にしたときの対辺寸法ごとの相対誤差は、図 5.6 のようになった。また、相対誤差の収束が比較的早い系列のみを選んだグラフは、図 5.7 のようになった。図 5.2 と比べて、相対誤差が 5% に収束するためには、対辺寸法が 30m ~ 1000m の範囲である必要があるといった違いはあるものの、大きな精度の改善などは無いことが確認できる。

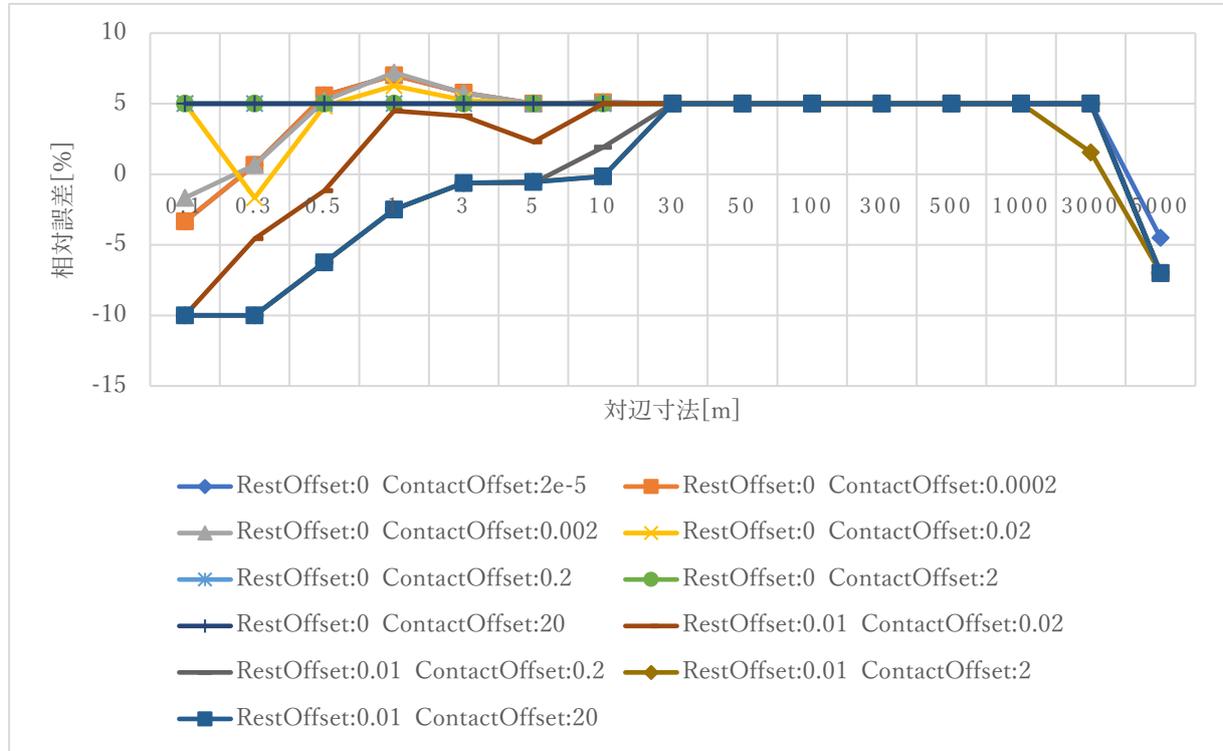


図 5.6 : CCD を無効にしたときの、対辺寸法の大きさと通過した球径の平均との相対誤差

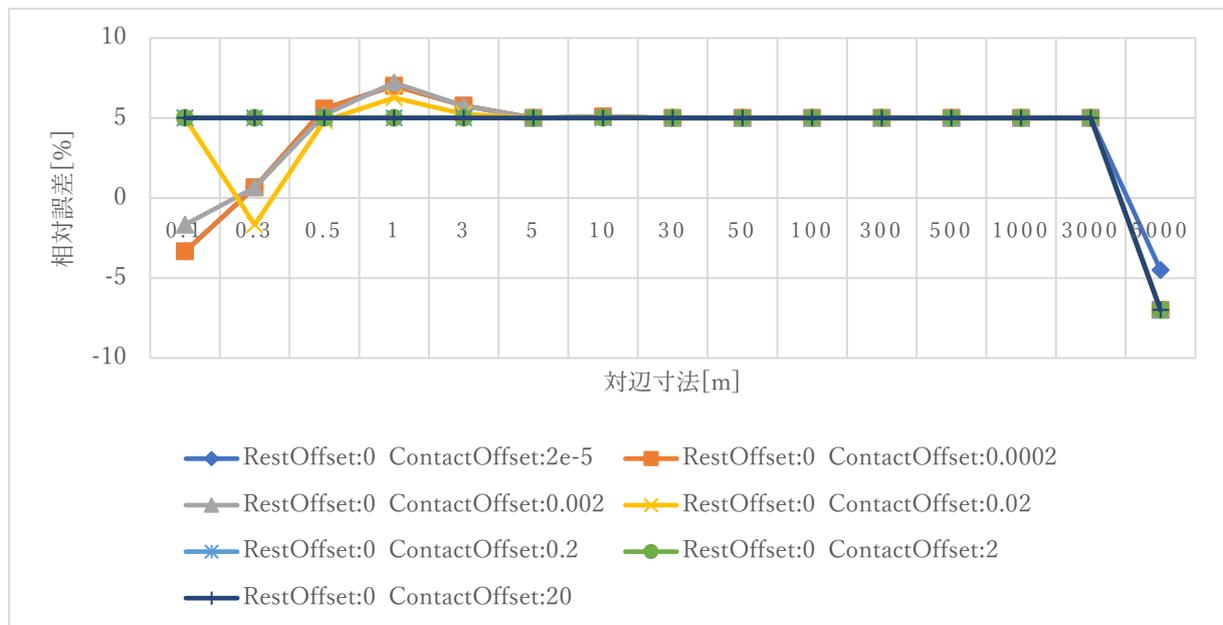


図 5.7 : 相対誤差の収束が早い系列に絞った図 5.6 のグラフ

20回のシミュレーションの分散は図 5.8 のようになった。また、分散が比較的小さくなる対辺寸法が 0.1m~3000m の範囲における、相対誤差の収束が比較的早い系列のみの分散は図 5.9 のようになった。こちらも CCD が有効のときと同様に、相対誤差が 5%に収束する対辺寸法においては分散がほぼ 0 であることが確認できた。

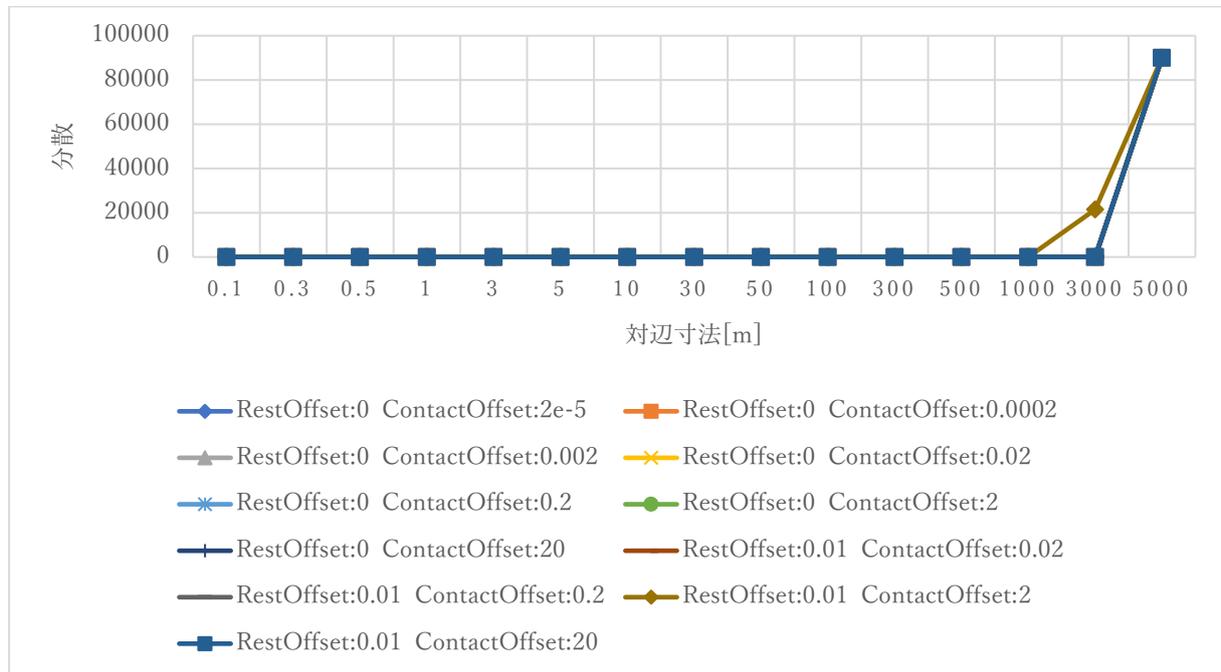


図 5.8 : CCD を無効にしたときのシミュレーションの分散

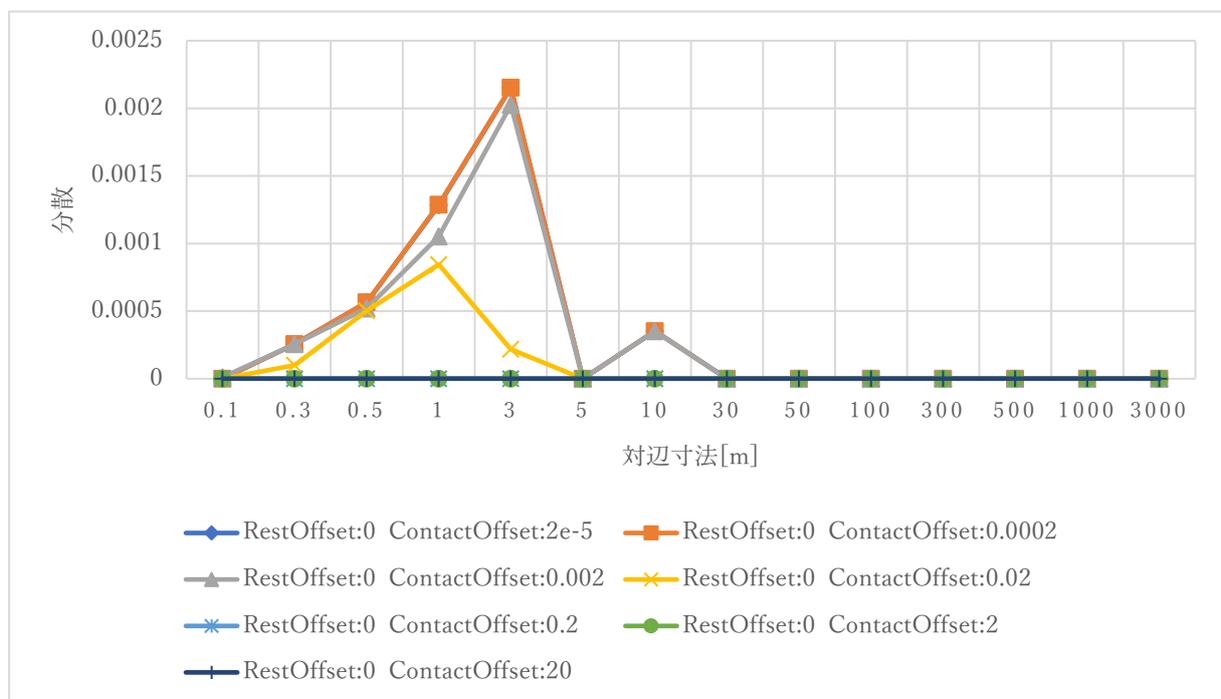


図 5.9 : 対辺寸法が 0.1m 以上 300m 以下における相対誤差の収束が早い系列のみの分散

5.2.3 CCDの有無による相対誤差の違い

CCDを有効にしたときと、無効にしたときの相対誤差には類似点が見られる。そこで、CCDの有無によって相対誤差が有意に異なるかを統計的に示す。CCDを有効にしたときの相対誤差をA群とし、CCDを無効にしたときの相対誤差をB群とする。ここでA群とB群で対応のあるt検定を全ての対辺寸法に対して行った。t検定の結果、対辺寸法が1m～300mの範囲のとき、p値は0.05を下回り、統計的有意差があることからCCDの有無による相対誤差に違いがないことが確認できた。

5.2.4 結論

対辺寸法がおおよそ30m～300mの範囲のとき、相対誤差は5%程度に収束することが確認された。これは金網フィルタに用いる線径がおおよそ100μm程度の大きさになるようにシーン全体をスケールリングすることで、より高精度なシミュレーションが行えることを示している。今後の実験では、金網フィルタの線径が最低でも100μm以上となるようなスケールリングを用いることとする。

Contact OffsetとRest Offsetの組み合わせが精度に与える影響は、Rest Offsetが0のとき、精度には影響がないことが確認された。また、Rest Offsetに0以上の値を選ぶと、精度は悪化することが確認された。今後の実験では、Contact OffsetとRest Offsetはデフォルト値である0.02と0をそれぞれ用いることとする。

CCDの有無が精度に与える影響は、適切なスケールリングの場合にシミュレーション結果に違いがないことが示された。今後は、CCDは有効にした状態で行うこととする。

第6章 近似形状としての角柱の角数

PhysX では円柱のコリジョンが存在しないため、近似形状として凸形状を用いた角柱のコリジョンを作る必要がある。このとき、角柱の断面形状としての多角形の角数を変えたとき、精度に影響があるか検証する。

6.1 実験方法

実験方法には、5.1 節の実験方法と同様の方法と条件で、多角形の角数を 16、32、64、128、256 に変更したときの相対誤差を求める。また、Contact Offset と Rest Offset はデフォルトの値とし、CCD は有効にした状態とする。

6.2 実験結果

実験結果の評価方法には、5.2 節と同様の相対誤差を用いる。

多角形の角数を変えたときの対辺寸法の大きさと、通過した球径の平均との相対誤差は図 6.1 のようになった。角数によって相対誤差が 5% に収束する対辺寸法が異なることが確認できる。しかし、5.2.4 節で相対誤差が収束すると結論付けた対辺寸法が 30m~300m の範囲においては、全ての角数で相対誤差が 5% となることが確認できた。

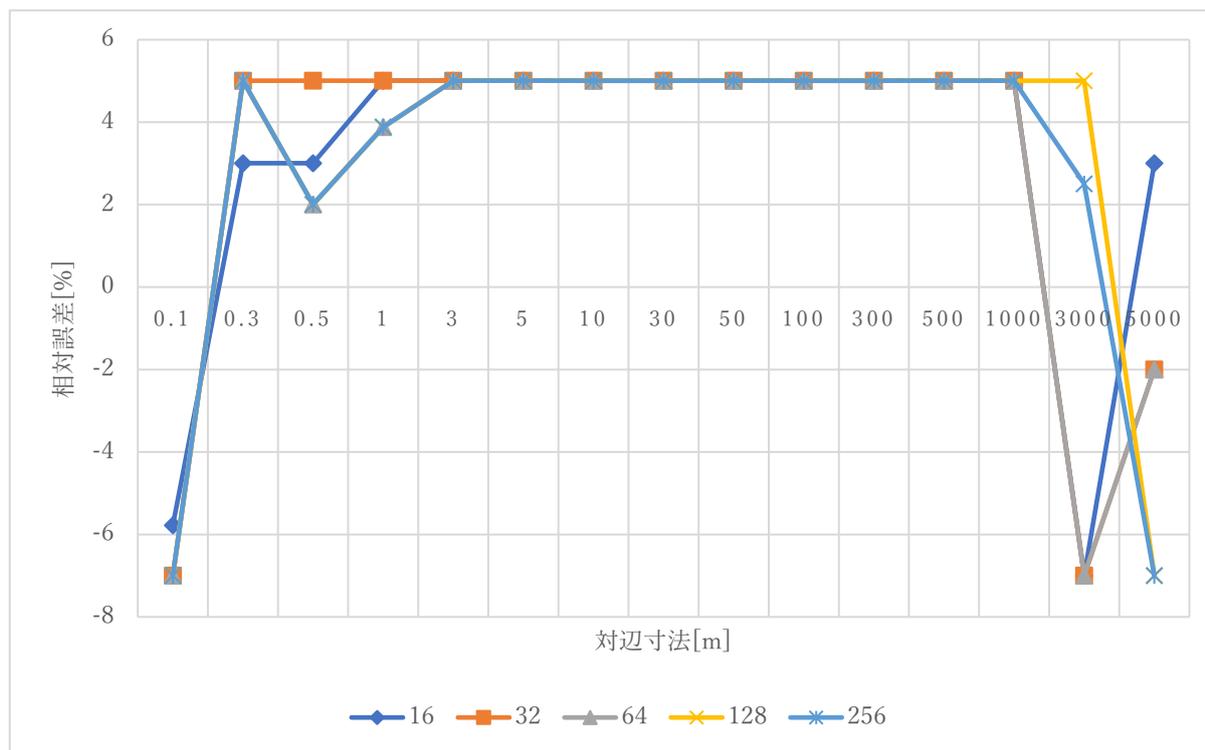


図 6.1 : 角数ごとの対辺寸法の大きさと通過した球径の平均との相対誤差

20 回のシミュレーションの分散は図 6.2 のようになった。また、分散が比較的小さい対辺寸法が 1000m 以下の分散は図 6.3 のようになった。こちらも 5.2 節とほぼ同様の結果が得られ、角数による違いは見られないことが確認できた。

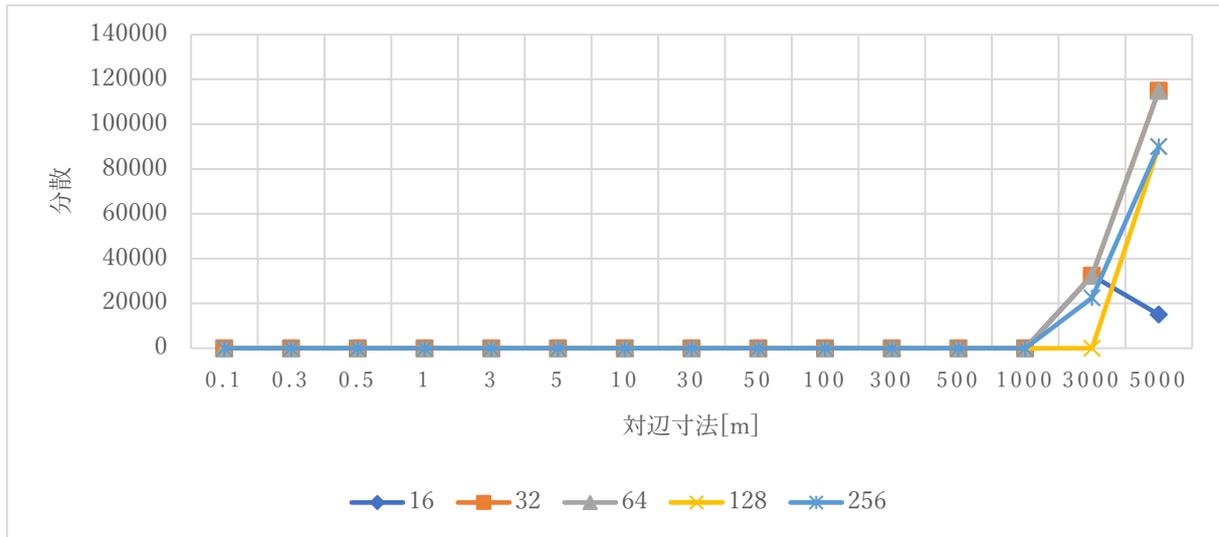


図 6.2 : 角数ごとのシミュレーションの分散

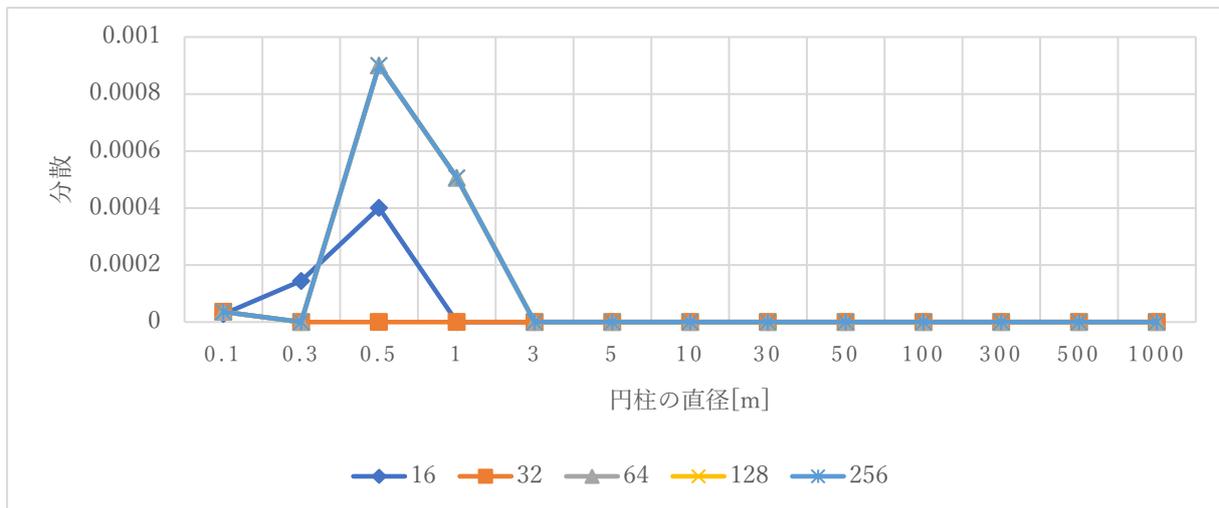


図 6.3 : 対辺寸法が 1000m 以下における角数ごとのシミュレーションの分散

結論としては、多角形の角数を変えたときのシミュレーション結果への影響は確認できなかった。しかし、平行に並ぶ角柱が面同士で向き合ったときは、角数 n に対して次の式で示される x だけ円柱が細くなるのと同等である。

$$x = 1 - \cos\left(\frac{\pi}{n}\right) \quad (6.1)$$

この誤差は角数が 16 分割のとき、平行に並ぶ 2 つの角柱の両方で 4%程度となり、32 分割のときは 1%程度になる。今回の実験では角柱の辺同士が向き合っているため、この誤差の影響を受けないと考えられる。しかし、金網フィルタの場合、角柱を複雑に織った結果、必ずしも辺同士が向き合うとは限らない。そこで、今後の実験では、円柱の近似形状の角柱の角数には、面同士が向き合ったときの誤差が比較的小さい 32 角形を用いることとする。

第7章 微細粒子の生成要否

山倉の手法[2]で用いられている ISO 自動車用 Air Cleaner Test Dust 粒子径分布[20]は、ケーキ形成に十分な影響を与えると考えられる粒子を生成すると、膨大な数の粒子が生成され、シミュレーション時間が長くなるという問題がある。しかし、最も多く生成される、金網フィルタに対して十分小さい粒子は、ケーキを形成することもなく大半が金網フィルタを通過し、ろ過性能に影響を与えないと考えられる。そこで、シミュレーションに影響を与えないと考えられる粒子径を実験によって求め、不要な粒子の生成を省くことでシミュレーション時間を短縮する。

7.1 実験方法

実験は、表 7.1 で示した条件下で、表 7.2 の金網フィルタに対して行う。ここで、表 7.2 における「絶対ろ過粒度」とは、粒子が金網フィルタの開孔部よりも大きいために、ろ過によって完全に除去されることが期待される粒子径である。

表 7.1 : 微細粒子の生成要否実験の条件

使用する PC	表 A.2 の PC1 と PC2 と PC3
タイムステップ分割数	16
金網断面形状	円に内接する 32 角形
粒子の初期配置	粒子径ごとの層として配置
金網と球の動摩擦係数	0.45
金網と球の静摩擦係数	0.45
金網と球の反発係数	0.45

表 7.2 : 微細粒子の生成要否実験に用いる金網フィルタの規格

タイプ	縦糸の直径[mm]	横糸の直径[mm]	縦糸のメッシュ数[mesh]	横糸のメッシュ数[mesh]	絶対ろ過粒度[μm]
平畳織 2	0.14	0.11	50	250	75
綾畳織 4	0.1	0.076	80	600	50
綾畳織 9	0.07	0.045	165	1200	25

まず実験で行うシミュレーションについて説明する。シミュレーションは、粒子径分布に沿った粒子を生成し、金網フィルタの上部から落下させる。このとき、粒子の初期配置は図 7.1 のように、小さい粒子径から順に粒子径の層として配置する。このように配置した球を落下させ、金網フィルタを通過した球数を粒子径ごとにカウントし、生成数と通過数から、捕集率を測定する。このシミュレーションは、球の初期生成をする高さを変更して、20 回行う。

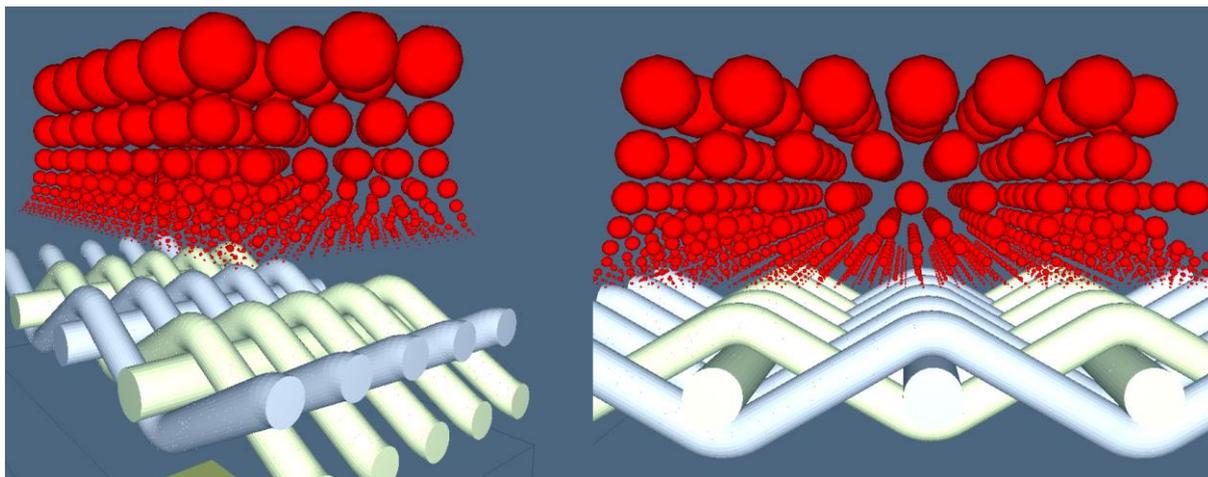


図 7.1 : 粒子径ごとの層として配置された粒子

使用する金網フィルタには、金網フィルタの大きさが異なるものを3つ用いる。金網フィルタのおおよその大きさの指標には絶対ろ過粒度を用い、これが75 μm 、50 μm 、25 μm のように等間隔に並ぶ3つの金網フィルタを選ぶ。

シミュレーションには、ISO 自動車用 Air Cleaner Test Dust 粒子径分布[20]を使用することができないため、表 7.3 に示すような独自の粒子径分布を「可変倍率粒子径分布」と定義し、これを用いるものとする。可変倍率粒子径分布は、シミュレーションを行う金網フィルタの縦線径と横線径のうち、小さい線径である「最小直径」に拡大率を掛けて得られる値を粒子径とし、現実的にシミュレーションを完了できる固定の粒子数を用いる粒子径分布である。

表 7.3 : 可変倍率粒子径分布

拡大率[%]	生成数
1	3892
1.5	2595
2.2	1730
3.3	1153
5	769
7.5	513
11.3	342
17	228
25.6	152
38.4	101
57.6	68
86.4	45
129.7	30
194.6	20

また、小さな粒子を正確にシミュレーションするため、生成する粒子の粒子径が 1m 以上となるようなスケールで実験を行う。可変倍率粒子径分布における最小の粒子径の倍率は 1% で、使用する金網フィルタの最小直径は 0.045mm なので、生成される最小の粒子径は 0.00045mm となる。シミュレーターでは 1mm を 1m として扱っているため、最小の粒子径を 1m にするためには 2200 倍拡大する必要がある。これを実現するためには、金網フィルタの直径が 100m となるようなシーン全体のスケーリングを選べば十分であるが、ここでは大きめに値をとり、使用する全ての金網フィルタの最小直径が 200m となるようなスケーリングを行う。

7.2 実験結果

20 回のシミュレーションによる通過粒子数の平均値と、生成粒子数から求めた拡大率ごとの捕集率は図 7.2 のようになった。図 7.2 から、粒子径が金網フィルタの最小直径の 7.5% 以下のとき、生成粒子数の 1% 以下の粒子が捕集され、99% 以上の粒子が金網フィルタを通過していることが確認できる。また、粒子径が金網フィルタの最小直径の 17% 程度の粒子であっても、捕集率は 10% 以下に抑えられていることが確認できる。

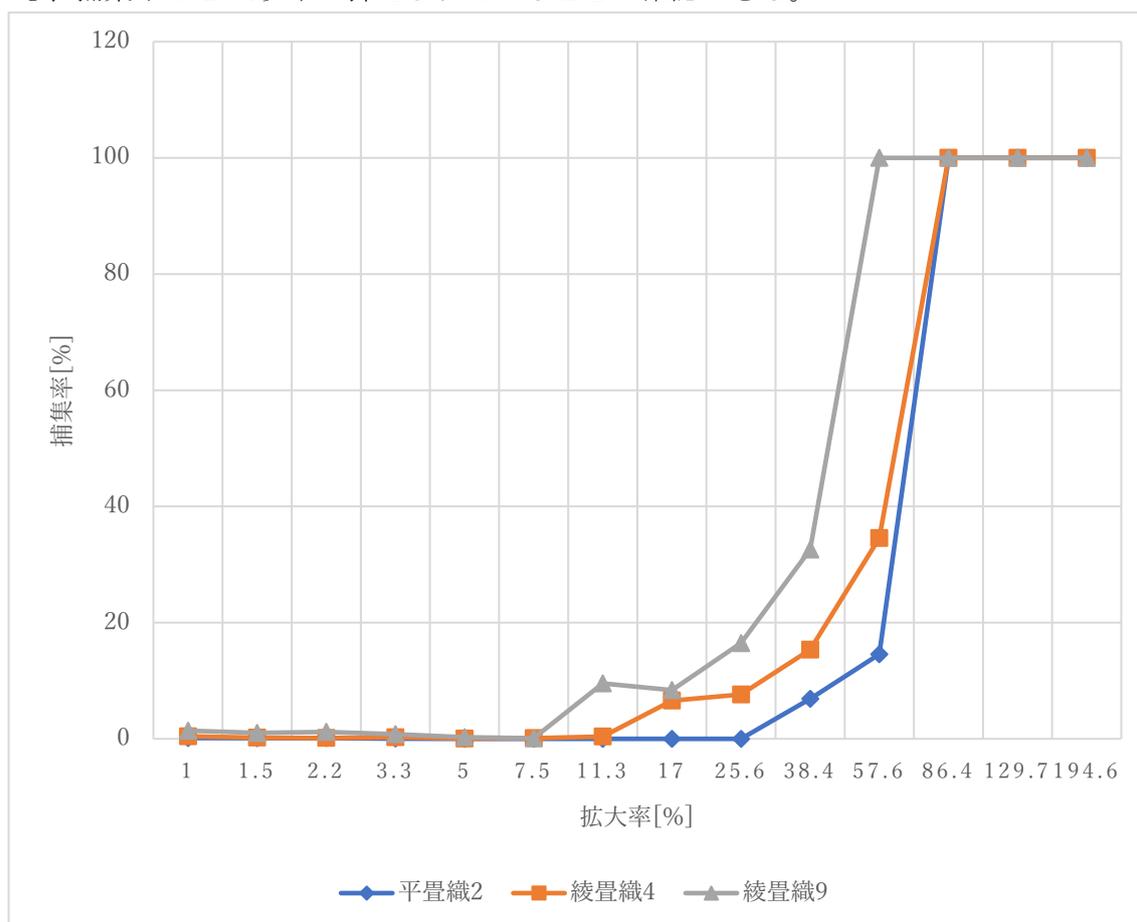


図 7.2 : 拡大率ごとの捕集率

20 回のシミュレーションにおける分散は、図 7.3 となった。図 7.3 から、拡大率が 5%~7% 付近の分散が小さいことが確認できる。

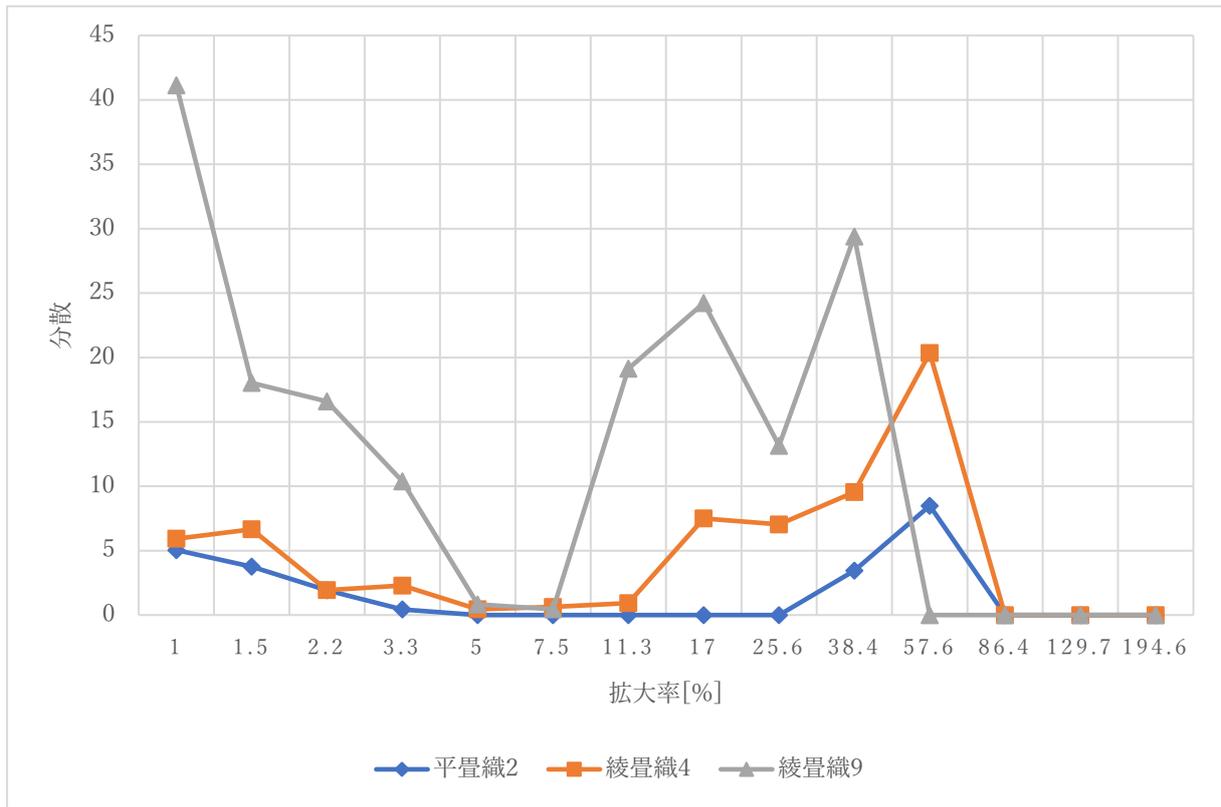


図 7.3 : 拡大率ごとの分散

結論としては、金網フィルタの最小直径の 5%以下の粒子径の粒子は、おおよそ金網フィルタによって捕集されず、シミュレーションから除外してもシミュレーションに影響を与えないと考えられる。今後、金網フィルタの最小直径の 5%以下の粒子径の粒子は生成を打ち止めするものとする。

第8章 金網フィルタと粒子の接触面特性

PhysX では、剛体に対して静摩擦係数、動摩擦係数、反発係数をそれぞれ設定できる。このような接触面に関する 3 つのパラメータを、本論文では「接触面特性」と呼ぶこととする。本章では、接触面特性を変更したとき、シミュレーション結果に影響があるかを検証する。

8.1 実験方法

実験は表 8.1 のような条件下で、表 8.2 の金網フィルタを対象に行う。

表 8.1 : 接触面特性を変更したときの精度実験の条件

使用する PC	表 A.2 の PC1
タイムステップ分割数	16
金網断面形状	円に内接する 32 角形
粒子の初期配置	粒子径ごとの層として配置

表 8.2 : 接触面特性を変更したときの精度実験に用いる金網フィルタの規格

タイプ	縦糸の直径[mm]	横糸の直径[mm]	縦糸のメッシュ数[mesh]	横糸のメッシュ数[mesh]	絶対ろ過粒度[μm]
綾畳織 15	0.035	0.025	325	2400	10

実験で行うシミュレーションは、7.1 節にて説明したものと同様の方法で行う。このようなシミュレーションを、球と金網フィルタの接触面特性である静摩擦係数、動摩擦係数、反発係数の 3 つのパラメータのうち、2 つのパラメータを 0.5 で固定し、残る 1 つのパラメータを 0.1 と 0.9 に変更してそれぞれ 20 回行う。

シミュレーションには、ケーキ形成を考慮して ISO 自動車用 Air Cleaner Test Dust 粒子径分布[20]を用いる予定であった。しかし、第 7 章で結論づけた微細粒子の打ち止めを行っても、十分な粒子を生成することが難しいため、表 8.3 で示す「パーティクルカウンタ粒子径分布」という独自の粒子径分布を定義し、これを用いる。パーティクルカウンタ粒子径分布は、複数のパーティクルカウンタの測定データに記載されている、原液の粒子数の平均値を粒子数とする粒子径分布である。

実験に用いる金網フィルタには、パーティクルカウンタ粒子径分布の粒子径の過半数をろ過できるものとして、絶対ろ過粒度が $10\mu\text{m}$ である金網フィルタを用いる。

表 8.3 : パーティクルカウンタ粒子径分布

粒子径(μm)	生成粒子数
5	10839
6	7445
7	4597
8	2750
9	1697
10	1860
12	823
15	328
20	100
30	20

しかし、パーティクルカウンタ粒子径分布に沿った粒子を生成し、比較的小さい金網フィルタでのシミュレーションに使用すると、最小の粒子径でも大きすぎるために、図 8.1 のように粒子が積み上がるという問題がある。

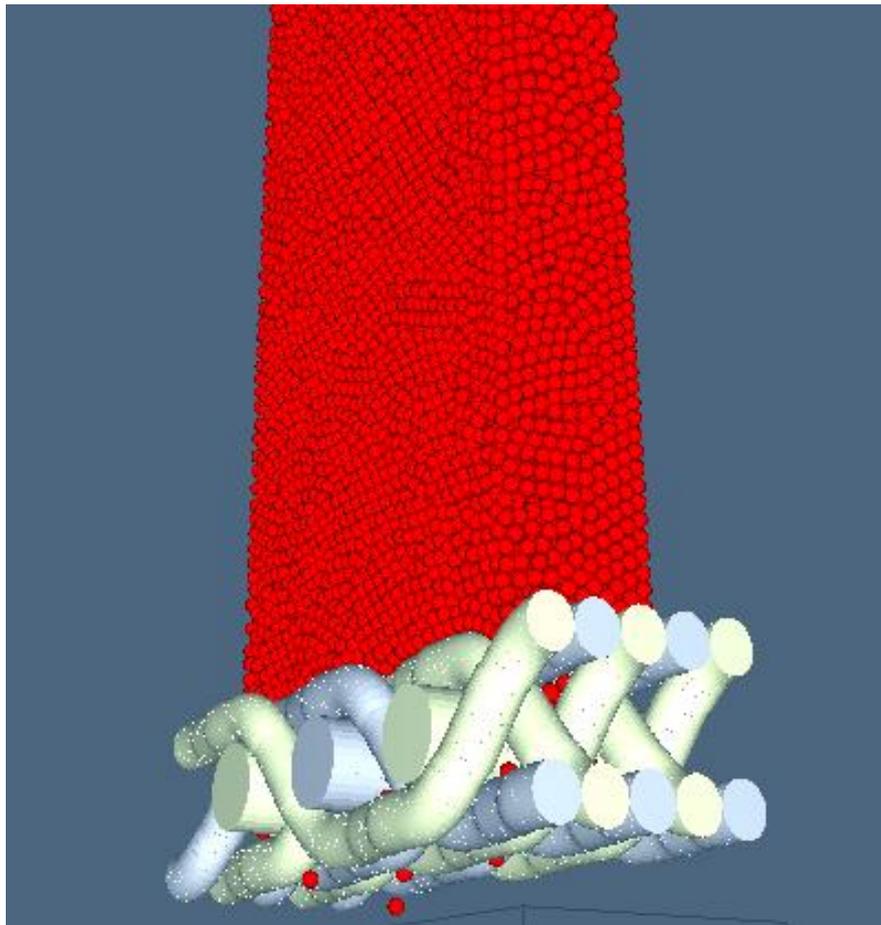


図 8.1 : 積み上がった粒子

この状態では、積み上がった粒子の上部にある粒子が、金網フィルタの位置まで降りてこないため、シミュレーション結果に影響を与えてしまうことは明らかである。問題を解決するためには、生成粒子数の比を保ったまま、金網フィルタの大きさに応じて粒子数を減らす必要がある。

そこで、パーティクルカウンタ粒子径分布の粒子径ごとの粒子数の比を維持したまま、金網フィルタのバウンディングボックスの体積の 15%相当となる体積をもつ粒子を生成する表 8.4 のような粒子径分布を定義し、これを用いることとした。

表 8.4 : 金網フィルタの体積に応じて粒子数を抑制したパーティクルカウンタ粒子径分布

粒子径[μm]	生成粒子数
5	367
6	252
7	156
8	93
9	58
10	63
12	28
15	11
20	3
30	1

8.2 実験結果

20回のシミュレーションによる粒子の平均捕集率は図 8.2 のようになった。また、シミュレーションの分散は、図 8.3 のようになった。ここで、図 8.2 と図 8.3 における系列名の static は静摩擦係数を、dynamic は動摩擦係数を、rest は反発係数をそれぞれ示している。

図 8.2 から、粒子径が 12 μm より大きいとき、捕集率は 100%となっていることが確認できる。粒子径が小さいときは、接触面特性の違いによる捕集率に影響がないように見えるが、粒子径が 10 μm のとき、接触面特性によっては最大で 6%ほど捕集率が異なることが確認できる。また、静摩擦係数、動摩擦係数、反発係数のいずれかの値が 0.9 のような比較的大きい値のとき、捕集率に差がでる傾向があり、特に反発係数を 0.9 にしたとき、捕集率が最も大きくなることが確認できる。

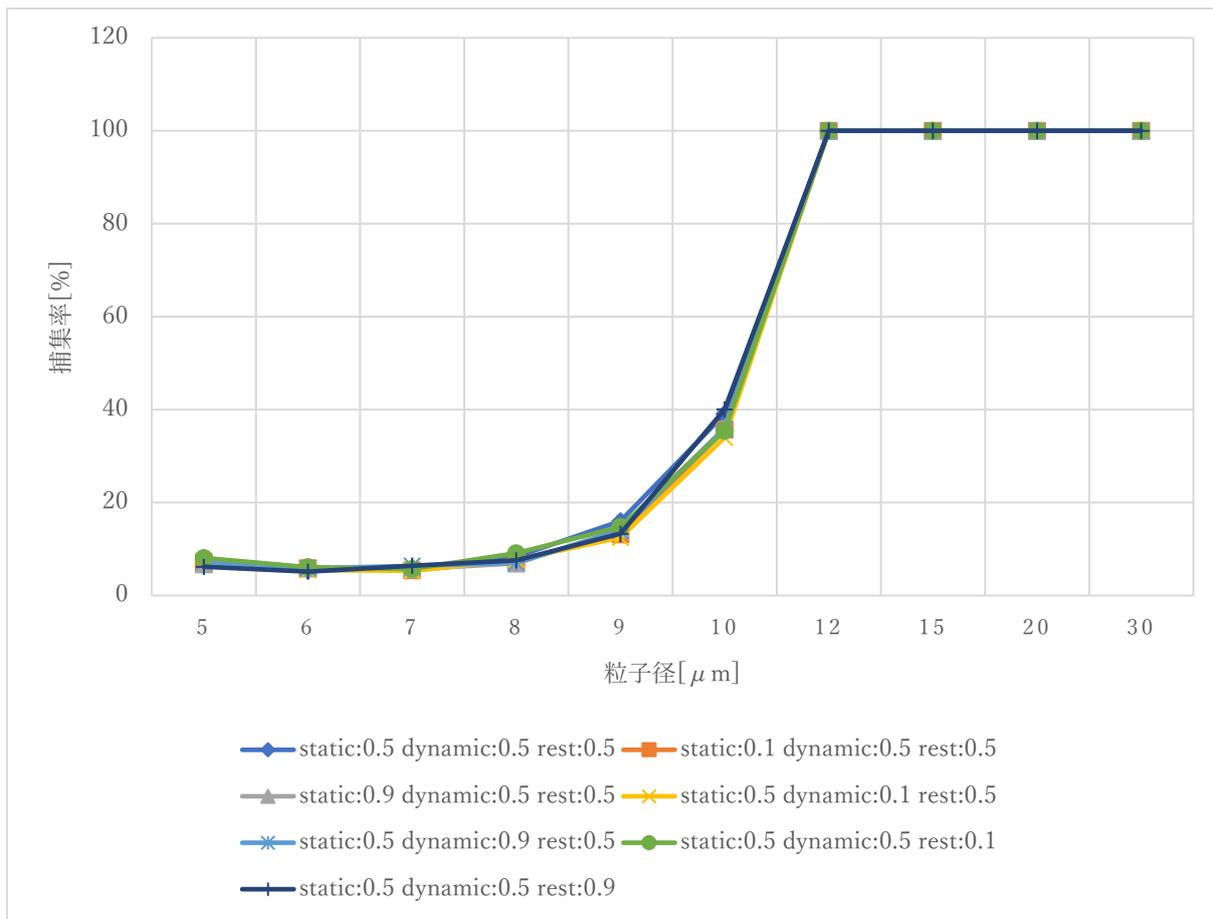


図 8.2 : 接触面特性を変えたときの粒子径ごとの捕集率

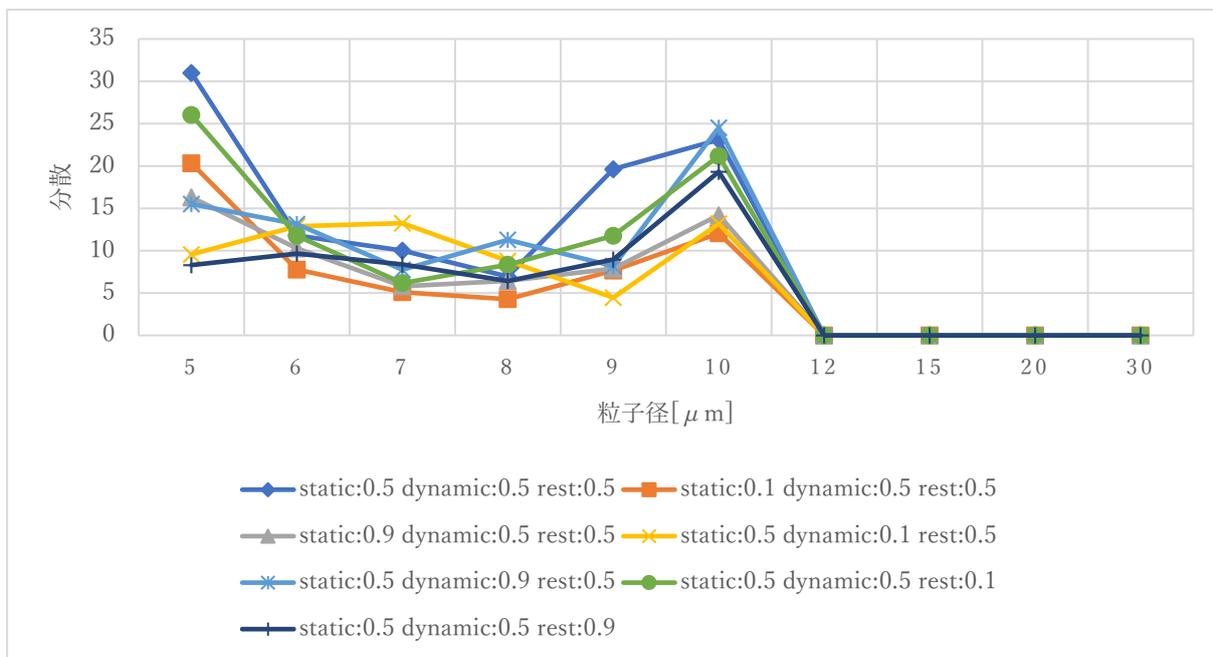


図 8.3 : 接触面特性を変えたときのシミュレーションの分散

結論としては、絶対ろ過粒度に近い粒子径において、接触面特性の違いによる粒子の捕集率への影響が確認された。これはケーキ形成が影響の一因であると考えられる。そこで、今後のシミュレーションで用いる接触面特性には、ケーキ形成を考慮すべきかどうかで使用する接触面特性を変更することとする。ケーキ形成を考慮すべきシミュレーションでは、よりケーキ形成の影響を出すために、静摩擦係数と動摩擦係数に比較的大きい係数である 0.9 を使用する。ケーキ形成を考慮しないシミュレーションでは、静摩擦係数と動摩擦係数に 0.1 を使用するものとする。

また、現実のろ過作業においては、粒子が液中に存在するマイクロスケールの物質であることを考慮し、反発係数には小さい値を採用することがより現実的である。よって、反発係数には 0.1 を採用するものとする。

第9章 粒子径の層の配置順序

これまでの実験では、粒子径の配置順序は、粒子径ごとの層として配置してきた。しかし、下層に配置される粒子径によっては、粒子の堆積状態に影響を与え、ろ過性能が変化することが考えられる。そこで本章では、粒子径ごとの層の配置順序を変えたとき、ろ過性能にどのような影響があるかを検証する。

9.1 実験方法

実験は表 9.1 のような条件下で行う。また、金網フィルタには表 8.2 で示したものを、粒子径分布には表 8.4 で示したものをを用いる。

表 9.1 : 粒子径ごとの層の配置順序を変えたときのろ過性能測定実験

使用する PC	表 A.2 の PC1
タイムステップ分割数	16
金網断面形状	円に内接する 32 角形
金網と球の動摩擦係数	0.45
金網と球の静摩擦係数	0.45
金網と球の反発係数	0.45

実験で行うシミュレーションは、7.1 節で述べたものと同様の方法で行う。このようなシミュレーションを、粒子径ごとの層の順序を入れ替えて、それぞれ 20 回ずつ行う。

実験で用いる表 8.3 の粒子径分布は、5 μm から 30 μm までの 10 個の粒子径を扱っているが、全ての粒子径による層を順序の組み合わせは10!通りと膨大な数であり、全て組み合わせについてシミュレーションするのは困難である。そこで、表 9.2 のように粒子径を 4 つのグループに分け、層の順序をグループごとに扱うことで 4!通りの組み合わせに対してシミュレーションを行うこととした。

表 9.2 : 粒子径のグループ

粒子径 [μm]	グループ番号
5	1
6	
7	2
8	
9	3
10	
12	
15	4
20	
30	

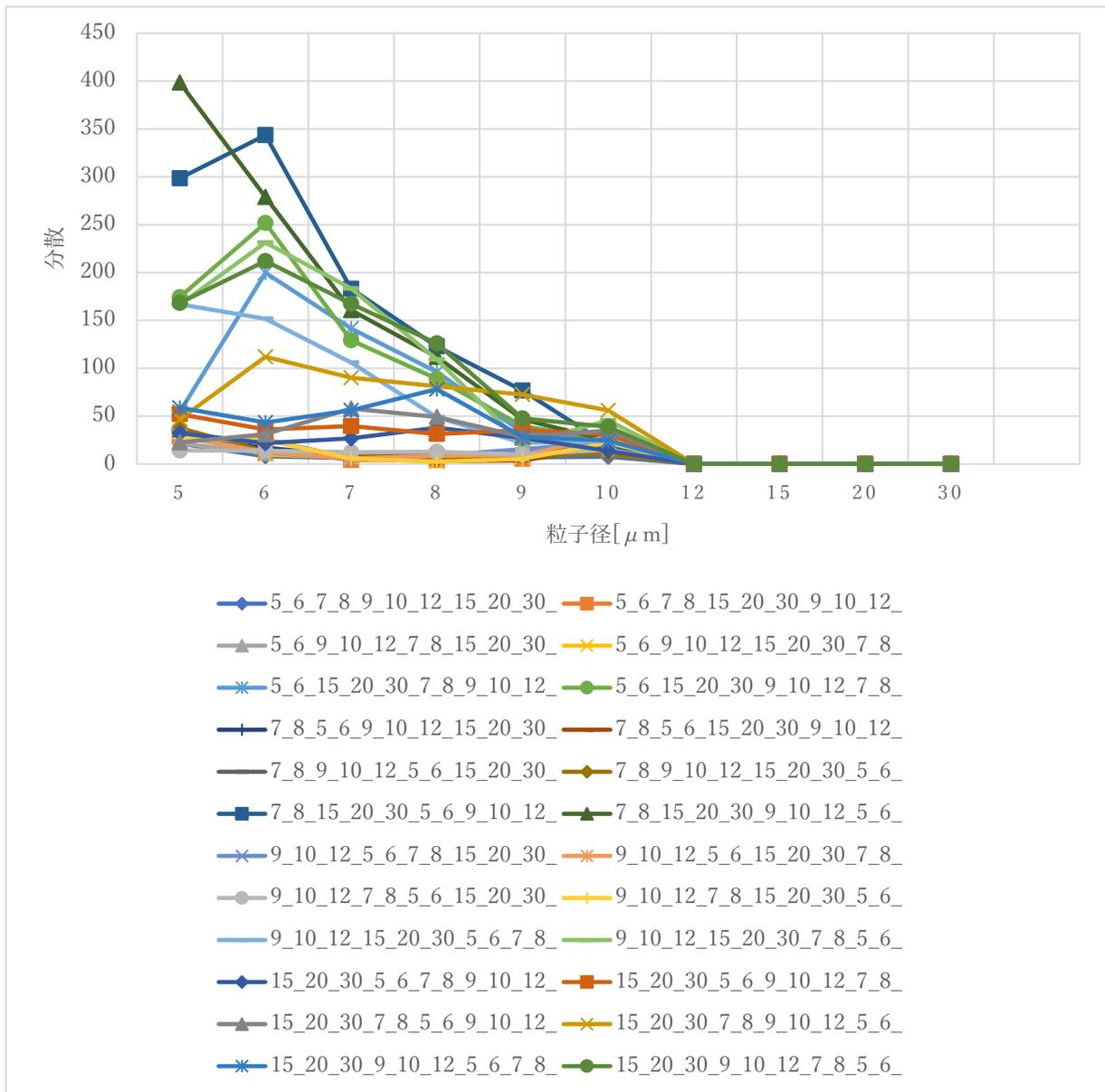


図 9.2 : 粒子径の層の順序を変えたときの粒子径ごとのシミュレーションの分散

結論としては、粒子径の層の順序はろ過性能に影響を与えており、特に粒子径の大きいものを下層に配置したときは、ケーキ形成が早まることで、粒子の捕集率が増加することが確認できた。

これらの結果から、8.2 節と同様に、シミュレーションがケーキ形成を考慮するかで粒子径の層の順序を切り替える。ケーキ形成を考慮するシミュレーションでは、粒子径が大きいものから順に下層に配置する。ケーキ形成を考慮しないシミュレーションでは、粒子径の小さいものから順に下層に配置することで、ケーキ形成の影響を小さくできると考えられる。

第10章 パーティクルカウンタの測定値との比較

本章では、これまでの実験結果をもとに、より良い精度となる条件下において、パーティクルカウンタによって測定されたデータとシミュレーション結果の比較を行い、シミュレーターのろ過性能を評価する。

10.1 実験方法

まず、パーティクルカウンタの測定データの中から、比較を行うことができる次のような条件を満たす測定データを選ぶ。

1. 株式会社八尾金網製作所が公開する金網規格表[19]に含まれる金網フィルタである。
2. ろ過する原液が同じである複数の金網フィルタにおいて、粒子径ごとの捕集率が全て0以上である。
3. 複数の金網フィルタの粒子径ごとの捕集率を比べたとき、明らかな外れ値を含まない金網フィルタである。

比較に用いる捕集率には、上記の条件を満たす複数の捕集率の平均値を用いることとする。今回の実験では、表 10.1 のような条件下で行う。また、金網フィルタには、条件を満たす測定データで使用されたものを用いる。使用する金網フィルタの一覧を表 10.2 に示す。

表 10.1 : パーティクルカウンタとの比較実験の条件

使用する PC	表 A.2 の PC2
タイムステップ分割数	16
金網断面形状	円に内接する 32 角形
粒子の初期配置	粒子径の層として配置 矩形詰め込みによる詰め込み配置
金網と球の動摩擦係数	0.9
金網と球の静摩擦係数	0.9
金網と球の反発係数	0.1

表 10.2 : 使用する金網フィルタの規格

タイプ	縦糸の直径[mm]	横糸の直径[mm]	縦糸のメッシュ数[mesh]	横糸のメッシュ数[mesh]	絶対ろ過粒度[μm]
綾豊織 14	0.04	0.028	270	2000	12
綾豊織 15	0.035	0.025	325	2400	10
綾豊織 18	0.025	0.015	500	3600	7

実験で行うシミュレーションは、7.1 節で説明したものと同様の方法で行う。

実験は、ケーキ形成の影響が強く現れる条件下で行う。すなわち、静摩擦係数と動摩擦係数には 0.9 を選び、反発係数には 0.1 を選ぶ。粒子の初期配置には、粒子径の層を粒子径が大

きい順に下層から配置する方式を採用する。しかし、粒子径の層としての配置方式において、規則的な粒子の配置は現実的ではない。そこで、より不規則な配置方式として、矩形詰め込みによる粒子の詰め込み配置も採用する。

矩形詰め込みとは、ユーザー指定の矩形領域に、できるだけ多くの幅と高さの異なる長方形を重なりなく配置する「長方形詰め込み問題」を解決するためのアルゴリズムである。ここでは、矩形詰め込みのアルゴリズムに **Bottom-Left 安定法**[21]を用いる。次に示す手順によって、図 10.1 のような粒子の詰め込み配置を行う。

1. 粒子径分布表から、1つの粒子径と、対応する粒子数を取り出す。取り出した粒子数を要素数とする配列を作成し、全ての要素を粒子径の値とする。これを粒子径分布表の全ての粒子径に対して行う。このとき、最大粒子径を S_{\max} とする。
2. 配列内の値が偏らないように、配列内の異なる値が等間隔で現れるようにソートする。
3. 金網フィルタのバウンディングボックスの幅と高さをもつ、詰め込み先の矩形 R_i を作成する。このとき、詰め込み先の矩形 R_i に新たな矩形を詰め込めないとき、新たな詰め込み先である矩形 R_{i+1} を作成し、 R_{i+1} に詰め込むものとする。
4. 配列内の値を幅と高さにもつ正方形を作成し、**Bottom-Left 安定法**によって R_i に詰め込む。
5. 配列内の全ての値を詰め込む。
6. R_n に詰め込まれた正方形 r_j の座標を (x_j, y_j) とする。正方形 r_j の幅 w_j を直径にもつ粒子を、座標 $(x_j + \frac{w_j}{2}, nS_{\max} + P_{\text{offset}}, y_j + \frac{w_j}{2})$ に作成する。このとき P_{offset} は、金網フィルタより高い位置に存在する、粒子を配置する高さの起点とする。

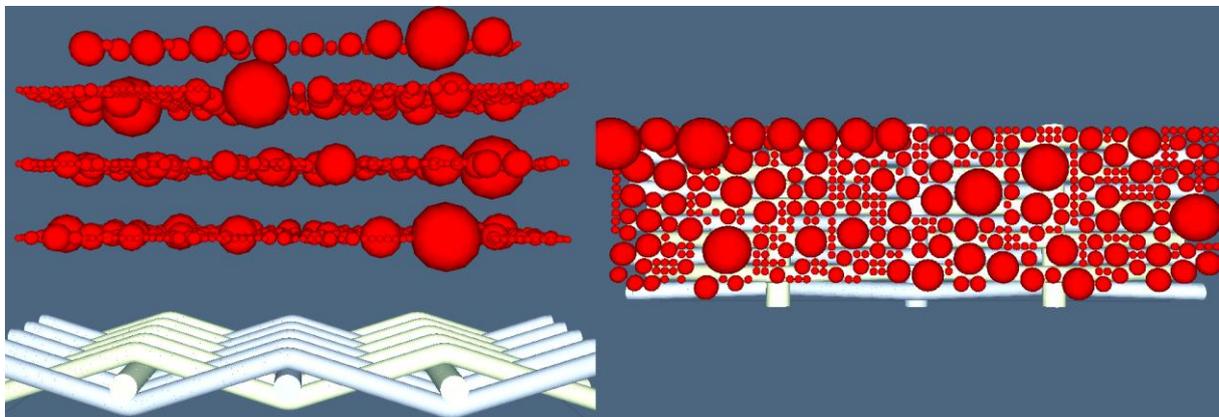


図 10.1 : 矩形詰め込みによって配置された粒子

最後に、実験に使用する粒子径分布について説明する。実験に用いる粒子径分布には、測定時の粒子群を再現するために、測定データに記載されている原液の区間カウントを用いる。しかし、原液の区間カウントを粒子数に選ぶと、生成粒子数が多いために金網フィルタに積み重なる図 8.1 と同様の問題が起きてしまう。そこで、8.1 節と同様に、粒子数の比を維持したまま、金網フィルタのバウンディングボックスの 15%相当の体積の粒子数に変更する。このとき、それぞれの金網フィルタにおける粒子径分布を表 10.3 に示す。

表 10.3 : 使用する粒子径分布

粒子径[μm]	生成粒子数		
	綾畳織 14	綾畳織 15	綾畳織 18
5	622	405	119
6	450	281	76
7	278	167	44
8	159	93	24
9	90	54	14
10	86	49	14
12	47	25	8
15	19	11	3
20	6	3	1
30	1	1	0

10.2 実験結果

20回のシミュレーションで、金網フィルタを通過した粒子数から平均捕集率を求め、測定データの捕集率との絶対誤差を計算する。

綾畳織 14 における絶対誤差を図 10.2 に示す。粒子径が小さいほど絶対誤差が小さく、絶対ろ過粒度付近で絶対誤差が最大になることが確認できる。グラフは絶対ろ過粒度まで右下がりとなっている。これはシミュレーションによる捕集率が、測定データの捕集率よりも小さい傾向にあることを示している。

粒子径の層として配置する場合と詰め込み配置では、粒子径の層として配置の方が絶対誤差が小さいことが確認できる。この結果は、ケーキ形成の影響が強い方がより測定データに近似できることを示していると考えられる。

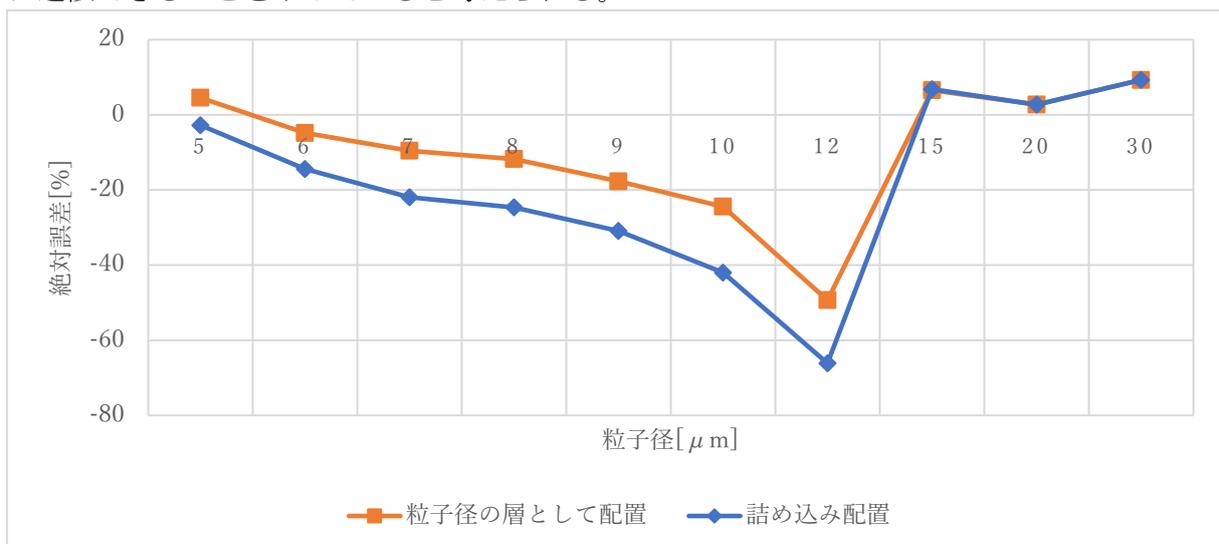


図 10.2 : 綾畳織 14 におけるシミュレーション結果の捕集率と、測定データの捕集率の絶対誤差

綾畳織 15 における絶対誤差を図 10.3 に示す。粒子径が小さいものほど絶対誤差が小さく、絶対ろ過粒度付近まで右下がりのグラフであり、粒子径の層として配置する方が絶対誤差が小さいなど、図 10.2 とほぼ同様の特徴があることを確認できる。

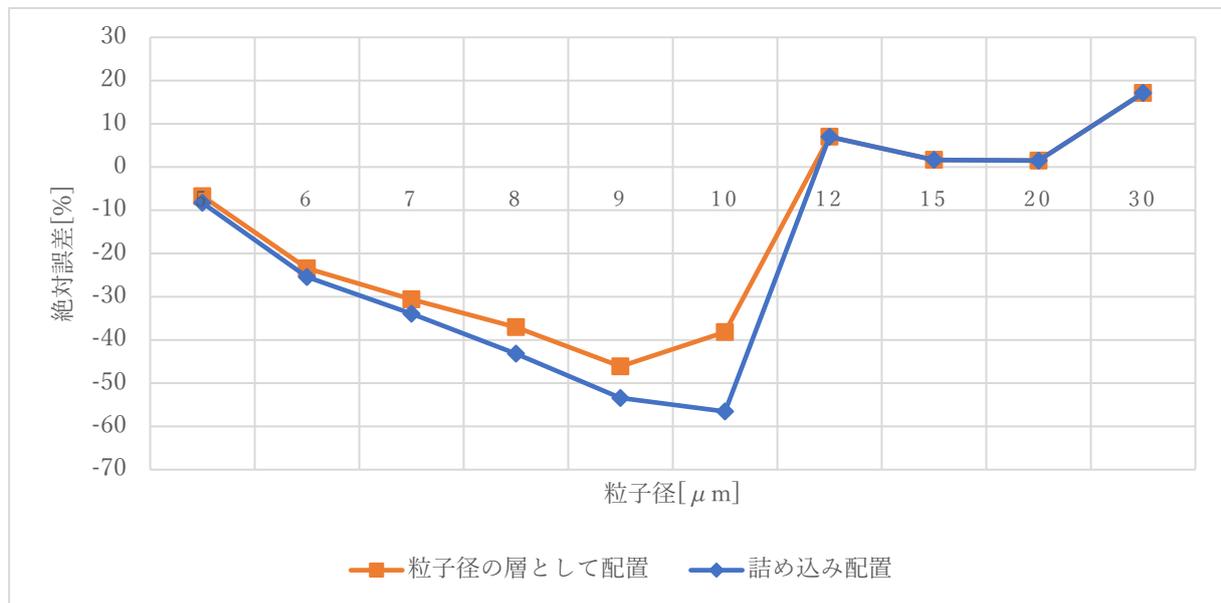


図 10.3 : 綾畳織 15 におけるシミュレーション結果の捕集率と、測定データの捕集率の絶対誤差

最後に、綾畳織 18 における絶対誤差を図 10.4 に示す。粒子径が 6μm のとき絶対誤差が最小となり、絶対ろ過粒度である 7μm のとき、絶対誤差が最大となることが確認できる。また、図 10.2 や図 10.3 と異なり、詰め込み配置の方が絶対誤差が小さいことが確認できる。

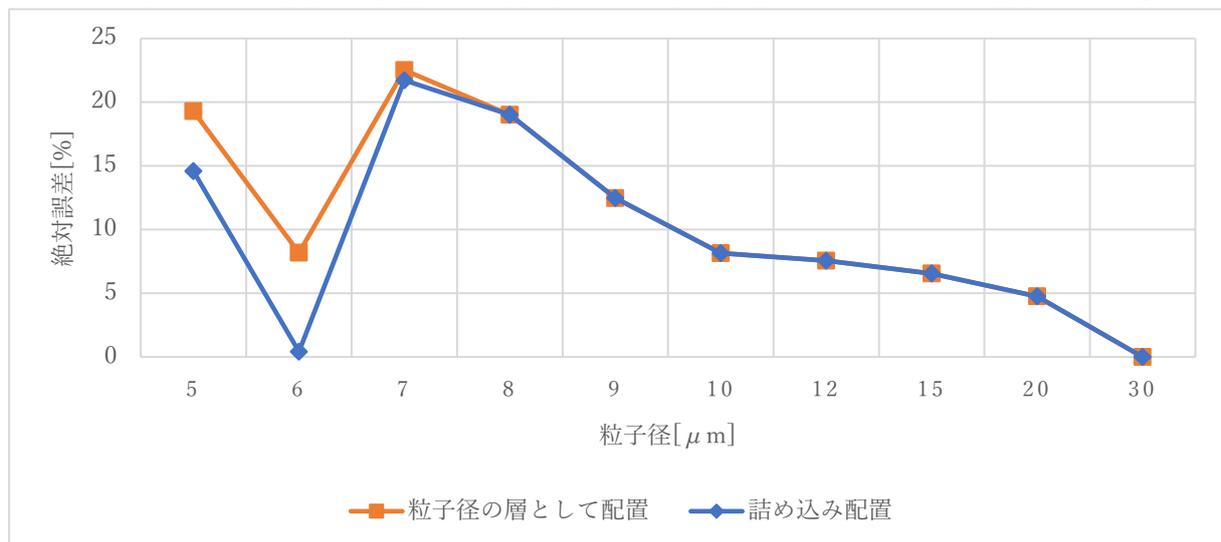


図 10.4 : 綾畳織 18 におけるシミュレーション結果の捕集率と、測定データの捕集率の絶対誤差

結論としては、粒子径が小さいほど絶対誤差が小さく、絶対ろ過粒度付近で絶対誤差が最大になるなどの傾向がみられる。しかし、誤差が大きい部分では絶対誤差が 50%以上となることから、シミュレーションによって、測定データと同様の値を予測するのは困難である。

また、パーティクルカウンタの精度に疑問が生じる部分もある。綾畳織 18 の絶対ろ過粒度

は7 μm であり、それ以上の粒子径の捕集率は速やかに100%に収束されることが期待される。しかし、測定データでは、絶対ろ過粒度以上の粒子径であっても、捕集率の収束の速さは緩やかである。本来検出されないことが期待される粒子も多く検出されており、測定データのどこまでの粒子径を信頼性できるろ過性能指標として用いるべきかという課題が残っている。

第11章 結論

11.1 まとめ

本研究は、剛体物理シミュレーションによって、豊織り構造の金網フィルタのろ過性能を推定するツールの基本的な精度を検証し、適切なパラメータを選ぶことができた。また、パーティクルカウンタによる実測値との比較を行うことで、ろ過性能指標の妥当性を検証した。

PhysXにおける物理シミュレーションの単位秒あたりの進行量を離散化したタイムステップ分割数は、値が小さいとコリジョン抜けと呼ばれる現象が発生し、シミュレーションの精度が悪化するという問題を確認した。また、タイムステップ分割数が16以上のとき、相対誤差が $\pm 5\%$ 程度に収束することを確認した。実験結果から、十分な精度を維持できる妥当なタイムステップ分割数として16を選ぶこととした。

PhysXの基礎的な物理シミュレーションの精度の検証では、PhysXシーンのスケールと、スケールに関連するパラメータの違いと、CCD機能の有無が精度に与える影響を検証した。実験により、対辺寸法が30m～300mの範囲のとき、理論値との相対誤差は約5%に収まることを確認した。また、スケールに関与するパラメータであるRest Offsetに0を選ぶことで精度が悪化しないことを確認した。また、CCDの有無が精度に影響しないことを確認した。実験結果から、金網の最小直径が100mになるようにシーン全体をスケールリングし、Contact OffsetとRest Offsetはデフォルトの値を選び、CCDは有効にすることとした。

金網フィルタの織り糸には、円柱の近似形状として角柱が用いられている。角柱の断面形状である多角形の角数を変えたとき、計算上は誤差が発生する。誤差が精度に影響を与えるか検証したところ、角数による影響はみられなかった。フィルタの織り方によって誤差が発生することを考慮し、角数には32を選ぶこととした。

現実的なシミュレーションには、膨大な量の粒子を生成する必要があるが、粒子数の増加に応じてシミュレーション時間が増加するという問題があった。一方で、金網に対して十分に小さい粒子径の粒子は、粒子を金網フィルタに通したときの捕集率に影響がないと期待されることから、生成を打ち止めできる粒子径について検証した。実験により、金網フィルタの最小直径の5%以下の粒子径の粒子は金網フィルタの捕集率が1%以下となることが確認できた。実験結果から、金網フィルタの最小直径の5%以下の粒子径の粒子は、生成を打ち止めすることとした。

PhysXにおける、剛体の摩擦係数や反発係数の値がシミュレーションに与える影響を検証した。実験により、動摩擦係数、静摩擦係数、反発係数のいずれかが大きい値のとき、金網フィルタの捕集率が大きくなり、最大で6%ほど粒子の捕集率に影響を与えることが確認できた。実験結果は、ケーキ形成による影響と考えられる。そこで、より現実的なシミュレーションのために反発係数には0.1を採用し、ケーキ形成を考慮するシミュレーションでは静摩擦係数と動摩擦係数に0.9を採用し、ケーキ形成を考慮しないシミュレーションでは、静摩擦係数と動摩擦係数に0.1を採用することとした。

粒子径の異なる粒子の初期配置は、粒子径ごとの層として配置してきたが、配置順序によっては、ケーキ形成が早まる可能性がある。そこで、層の配置順序がシミュレーション結果に与える影響を検証した。実験により、小さい粒子径の層を下層に配置した場合と、大きい粒子径の層を下層に配置した場合とでは、後者の方が粒子の捕集率が高く、前者と後者を比較すると、捕集率が最大で45%ほど異なることを確認した。ケーキ形成に影響を与えるシミュレーションでは、大きい粒子径の層を下層に配置することとした。

これらの実験結果を踏まえて、パーティクルカウンタの測定データとの比較を行った。測定データとの比較の結果、粒子径が小さいほど測定データとの絶対誤差は小さく、粒子径が絶対ろ過粒度に近づくにつれて絶対誤差は悪化するといった共通の傾向は見られた。しかし、絶対誤差が大きい部分に関しては 50%を超えることから、シミュレーションによって測定データと同様の値を予測するのは困難であると考えられる。

11.2 今後の課題

実験結果から、最小ろ過粒度を推測するシミュレーションの精度は比較的優れていたが、粒子径ごとの金網フィルタの捕集率を予測するのは困難であることが判明した。原因の 1 つとして、金網フィルタの絶対ろ過粒度以上の粒子径の粒子が検出される、測定データの精度の妥当性が考えられる。シミュレーションの精度の改善には、測定データの妥当性の検証に加えて、シミュレーターのさらなる改善が必要である。改善方法としては、PhysX の基礎的な精度検証で得られた相対誤差を、なるべく小さくするような補正值を導入することなどが考えられる。また、改善後も、どれだけ測定データをろ過性能指標として用いることができるかについて、検証を行う必要がある。

また、十分に小さい粒子をシミュレーションから省けるかについて検証し、シミュレーションにかかる時間を改善したが、依然としてシミュレーションによっては多くの時間を要する。リアルタイムでのシミュレーションを可能にし、多くの金網フィルタのろ過性能を測定するためには、シミュレーターの高速化が必要であると考えられる。

本システムが、ろ過性能指標を測定するための標準となるためには、金網フィルタの製造を行っている企業との連携が重要である。企業が求めるろ過性能測定のための機能を取り入れ、シミュレーション結果の妥当性を検証し、改良を繰り返すことで、実務レベルで活用可能な業界標準のツールに改善できると考えられる。

付録 A 使用した環境

シミュレーションを行った環境の情報を以下に示す。表 A.1 は、提案システムの開発に使用したライブラリと、開発環境のバージョンの一覧である。表 A.2 は、シミュレーションに使用した PC のスペックである。複数の PC を用いて同じシミュレーションを行う場合、PC スペックによってシミュレーション結果が異なる可能性が考えられる。しかし、PhysX のシミュレーションは、同じパラメータによるシミュレーションは同じ結果になるという性質があるため、実行速度が直接問題になる実験以外では、シミュレーション時間の短縮のために複数の PC を用いることとした。

表 A.1 : 使用したライブラリと開発環境のバージョン

ライブラリと開発環境	バージョン
PhysX	3.4.1.0
Qt	5.9.0.0
Freeglut	3.0.0.0
Visual Studio 2015 Community	14.0.25431.01

表 A.2 : 使用した PC のスペック

	OS	CPU	RAM
PC1	Windows10 Pro	Intel® Core™ i5-4210U CPU @ 1.70GHz	4.00 GB
PC2	Windows10 Pro	Intel® Core™ i5-6600 CPU @ 3.30GHz	16.00GB
PC3	Windows 8.1	Intel® Core™ i7-4500U CPU @ 1.80GHz	4.00 GB

謝辞

本研究にあたり、親身なご指導とご厚情を頂きました本学大学院システム情報工学研究科の三谷純教授に心より深謝申し上げます。また、共同研究として多岐に渡るご尽力を賜りました株式会社八尾金網製作所様と、本研究の先輩である山倉洗人さんに感謝申し上げます。そして、非数値処理アルゴリズム研究室の皆様には、多くの貴重なご意見を頂きましたことを心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 小林嵩史, 三谷純, 石川幸男, 剛体物理シミュレーションを用いた「畳織り」金網のろ過性能算出ツールの提案, 日本機械学会論文集 A 編 78.786, 2012, pp.179-189.
- [2] 山倉洗人, 三谷純, 微細空間域の各種畳織り金網のろ過性能評価システムの開発, 筑波大学情報学群情報科学類卒業研究論文, 2016.
- [3] Haver&Boecker <http://www.weavingideas.com/en/>
- [4] Sabit Adanur, Tianyi Liao, 3D modeling of textile composite preforms, Department of Textile Engineering, Auburn University, Auburn, AL 36849, USA, 1998.
- [5] Ko, F.K., Textile Structural Composites, ed. T.W. Chou and F.K. Ko. Elsevier, New York, 1989, pp. 129-171.
- [6] Ma, C.L., Yang, J.M. and Chou, T.W., Proc. 7th Conf. on Composite Materials: Testing and Design, ed. J.M. Whitney, ASTM STP-893. ASTM, Philadelphia, PA, 1986, p. 404.
- [7] Yang, J.M., Ma, C.L. and Chou, T.M., Fiber inclination model of three dimensional textile structure composites. J. Comp. Mater., 1986, 20, 472.
- [8] Ishikawa, T. and Chou, T.W., Stiffness and strength behavior of woven fabric composites. J. Mater. Sci., 1987, 17, 3211.
- [9] Ishikawa, T. and Chou, T.W., One-dimensional micromechanical analysis of woven fabric composites. AIAA J., 1983, 21, 1714.
- [10] Chen, X., Knox, R.T., McKenna, D.F. and Mather, R. R., Solid modeling and integrated manufacturing of textile interlinking structures. Proc. Int. Conf. on Design to Manufacture in Modern Industry, Beld, Slovenia, June 1993, p. 682.
- [11] Ko, F.K., Pastore, C.M., Yang, J.M. and Chou, T.W., Structure and properties of multilayer multidirectional warp knit fabric reinforced composites, Proc. Composites 86: Recent Advances in Japan and the United States, ed. K. Kawate et al. Tokyo, 1986, p. 21.
- [12] Whitney, T.J. and Chou, T.W., Modeling of 3D angle interlock textile structural composites. J. Comp. Mater., 1989, 23(9), 890.
- [13] Keefe, M., Solid modeling of yarn and fiber assemblies. J. Text. Inst., 1992, 83, 185.
- [14] M.A. Nazarboland X. Chen J.W.S. Hearle R. Lydon M. Moss, Modelling and simulation of filtration through woven media, International Journal of Clothing Science and Technology, 2008, Vol. 20 Iss 3 pp. 150 -160.
- [15] Nazarboland, M.A., Chen, X., Hearle, J.W.S., Lydon, R. and Moss, M., Computer simulation of filtration process through woven fabrics, paper presented at Multi-conference in Computational Engineering in Systems Applications, Beijing, 2006a.
- [16] Peirce, F.T., The geometry of cloth structure, J. Textile Inst., 1937, Vol. 28, p. T45.
- [17] de Boor, C., Hollig, K. and Sabin, M., High accuracy geometric Hermit interpolation, Comp. Aided Geo. Des., 1987, Vol. 4, pp. 269-78.
- [18] Fluent Inc., Fluent User's Guide, Version 6.1, Fluent Inc., Lebanon, NH, available at: www.fluent.com, 2004.
- [19] 株式会社八尾金網製作所 <http://www.yaokanaami.co.jp/>
- [20] 一般社団法人日本粉体工業技術協会 <http://appie.or.jp/>
- [21] 今掘愼治, 梅谷俊治, 切出し・詰込み問題とその応用ー (2) 長方形詰込み問題一. 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, 2007, Volume 50 pp. 335-340.